



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Arttu Gauffin-Kauste

ADMITTANSSIPOHJAINEN MAASUL- KUSUOJAUS ABB REF615:LLA

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|---|
| Tekijä | Arttu Gauffin-Kauste |
| Opinnäytetyön nimi | Admittanssipohjainen maasulkusuojaus ABB REF615:lla |
| Vuosi | 2018 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 49 + 1 liite |
| Ohjaaja | Mikko Västi |

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia admittanssipohjaisen maasulkusuojausfunktion (EFPADM) toimintaa keskijänniteverkoissa. Työn tavoitteena oli tutkia kuinka herkün releen toiminnan EFPADM-funktiolla voidaan saavuttaa ja luoda ohjeet funktion asetteluiden laskennalle.

Työssä käydään läpi maasulkuvian aiheuttamia vaikutuksia maasta erotetussa sähköverkossa ja kompensoidussa sähköverkossa. Erityisesti käydään läpi miten sähköverkon perussuureet muuttuvat näillä verkon maadoitustavoilla maasulkuvian aikana ja miten relesuojauksella saadaan aikaiseksi suojaus maasulkuvikoja vastaan. Työssä tutustuttiin admittanssipohjaiseen maasulkusuojausfunktioon (EFPADM). Kerrotaan mihin EFPADM-funktion toiminta perustuu ja kuinka funktion toimintalogiikka toimii maasulkuvian aikana. Tarkoituksena on selvittää miten EFPADM-funktion asetteluparametrit toimivat ja miten ne vaikuttavat releen toimintaan. Funktion toimintaa tutkittiin fyysisesti kokeilla 20 kV:n jakeluverkkomallissa laboratorio-olosuhteissa.

Työn tuloksena pystyttiin luomaan EFPADM-funktiolle asetteluparametrit, jotka toimivat sekä maasta erotetussa sähköverkossa että kompensoidussa sähköverkossa. Releen toiminnan herkkyydeksi saavutettiin maksimissaan 11kΩ. Työssä onnistuttiin myös selvittämään EFPADM-funktion asetteluiden vaikutukset releen toimintaan ja miten asettelut laskettiin toimivan suojauksen aikaansaamiseksi.

| | |
|------------|--|
| Avainsanat | maasulku, relesuojaus, admittanssi, maasta erotettu sähköverkko, kompensoitu sähköverkko |
|------------|--|

ABSTRACT

| | |
|--------------------|--|
| Author | Arttu Gauffin-Kauste |
| Title | Admittance Based Earth-Fault Protection with ABB REF615 |
| Year | 2018 |
| Language | Finnish |
| Pages | 49 + 1 Appendix |
| Name of Supervisor | Mikko Västi |

The purpose of this thesis was to study the functionality of the admittance based earth-fault protection (EFPADM) in medium voltage networks. The aim of this thesis was to study how sensitive of an earth-fault protection it is possible to achieve using the EFPADM-function and to create a guide to setting the function parameters.

This thesis deals with the subject of the effects on separated networks and compensated networks during an earth-fault, especially how the basic values of the networks change during an earth-fault and how it is managed to create a working earth-fault protection using relays. This thesis also deals with the functionality of the EFPADM-function and its operation during an earth-fault. The purpose was to find out how the setting parameters of the function work and how do they affect the operation of the relay. The operation of the EFPADM-function was physically studied on a 20kV distribution network model in laboratory conditions.

This thesis resulted in creating setting parameters on the EFPADM-function, which worked well on both a separated network and a compensated network. The maximum sensitivity of the relay was 11k Ω . The thesis also explains how the setting parameters affected on the functionality of the relay and how the setting parameters were calculated to achieve a properly working earth-fault protection.

| | |
|----------|---|
| Keywords | earth-fault, relay protection, admittance, separated network and compensated network |
|----------|---|

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 5 |
| 2 | MAASULKU | 6 |
| 2.1 | Maasulku maasta erotetussa sähköverkossa | 6 |
| 2.2 | Maasulku kompensoidussa sähköverkossa | 9 |
| 2.3 | Maasulkusuojaus | 12 |
| 2.3.1 | Relesuojaus | 12 |
| 2.3.2 | Kosketusjännitteiden muodostuminen maasulussa | 15 |
| 3 | ADMITTANSSIPOHJAINEN MAASULKUFUNKTIO | 17 |
| 3.1 | EFPADM-funktio | 17 |
| 3.2 | Toimintakarakteristiikat | 24 |
| 4 | FUNKTION ASETTELUIDEN LASKENTA | 30 |
| 4.1 | EFPADM-asetteluiden laskenta | 30 |
| 4.2 | Asetteluiden laskenta maasta erotetussa verkossa | 32 |
| 4.2.1 | Asetteluiden laskenta kompensoidussa verkossa | 33 |
| 4.2.2 | Laajakulma-asettelut | 35 |
| 5 | LABORATORIOKOKKEET | 37 |
| 5.1 | EFPADM (Admittanssipohjainen maasulkusuojaus) | 38 |
| 5.2 | Maasta erotettu sähköverkko | 39 |
| 5.2.1 | Kompensoitu sähköverkko | 41 |
| 6 | YHTEENVETO JA POHDINTA | 45 |
| | LÄHTEET | 49 |

LIITTEET

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutustutaan admittanssipohjaiseen maasulkusuojausfunktioon (EFPADM), joka on vaihtoehtoinen suojausfunktio maasulkuvioille keskijänniteverkoissa. Admittanssipohjainen maasulkusuojaus on alun perin kehitetty Puolassa 1980-luvulla, ja on siellä sähköverkon vakioratkaisu maasulkusuojaukseen. /5/

Admittanssipohjaisen maasulkusuojausfunktion laskenta perustuu nimensä mukaisesti nollajännitteestä ja nollavirrasta laskettavaan maapiirin admittanssiin. Admittanssi (Y) on impedanssin käänteisluku ja sen arvojen laatu ilmoitetaan siemensseinä [S]. Admittanssi ilmoitetaan kompleksilukuna, jonka reaalikomponentti on konduktanssi (G) ja imaginäärikomponentti on suskeptanssi (B).

Työssä tutkitaan kuinka herkän maasulkusuojauksen toiminnan EFPADM-funktiolla pystytään saavuttamaan maasta erotetussa sähköverkossa ja kompensoidussa sähköverkossa. Tutkimukset suoritetaan laboratorio-olosuhteissa käyttäen ABB REF615-relettä sekä 20kV:n jakeluverkkomallia. Työn toinen tavoite on luoda ohjeet EFPADM-funktion asetteluiden laskentaan. Työssä pyritään vastaamaan siihen, kuinka funktion asettelut vaikuttavat releen herkkyyteen, ja mitä vaaditaan verkon rakenteelta ja funktion asetteluilta, jotta voidaan saavuttaa toimiva konfigurointi sekä maasta erotetulle verkolle että kompensoidulle verkolle.

2 MAASULKU

2.1 Maasulku maasta erotetussa sähköverkossa

Maasta erotettu sähköverkko on verkon rakenne, jonka muuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu. Normaalissa tilassa maasta erotetussa verkossa kaikki vaihejännitteet ovat sinimuotoisia ja 120° -kulmassa toisistaan. Tällöin verkon vaihejännitteiden osoittimien summa eli nollajännite (U_0) on n. 0 V. Jos verkko olisi täysin symmetrinen, nollajännite olisi 0 V, mutta lieväkin epäsymmetria verkossa aiheuttaa pientä nollajännitettä. /1/

Maasulku on vikatilanne, jossa sähköverkon jokin tai useampi vaihejohdin on yhteydessä maahan. Maasulkuvika on seurausta esimerkiksi sähköverkon vaihejohtimen päälle kaatuneesta puusta tai poikki menneestä vaihejohtimesta, jonka johdosta vaihejohdin on galvaanisesti yhteydessä maahan. Maasulun sattuessa maasta erotettuun verkkoon, maasulku muodostaa vikavirtapiirin vaikka muuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu. Maasulkuvirta sulkeutuu takaisin verkkoon vaihejohtojen aiheuttamien maakapasitanssien kautta. /1/

Maasulkuvirran suuruus (A), kun vikavastus (R_F) on 0Ω , voidaan laskea kaavasta:

$$I_E = \sqrt{3} * \omega * C_0 * U, \text{ jossa } I_E = \text{maasulkuvirta, kun vikavastus on } 0 \Omega$$

$$\omega = \text{verkon kulmataajuus } 2 * \pi * f, f = 50\text{Hz}$$

$$C_0 = \text{verkon maakapasitanssi (F)}$$

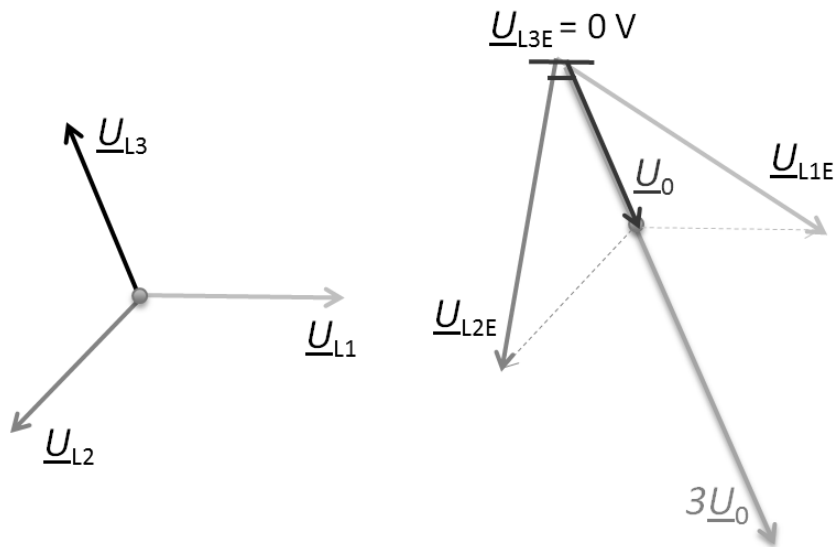
$$U = \text{pääjännite (V)} \quad (1)$$

Maasulkuvirran suuruus, kun vikavastus ei ole 0Ω , voidaan laskea kaavasta:

$$I_{ef} = \frac{I_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * I_E * R_f}{U}\right)^2}}, \text{ jossa } I_{ef} = \text{maasulkuvirta vastuksen } (R_f) \text{ arvolla}$$

$$R_f = \text{vikavastuksen resistanssi } (\Omega) \quad (2)$$

Maasulun aikana verkon nollajännite (U_0) kasvaa. Epäsymmetrisessä verkossa esiintyy terveessä tilassa pientä nollajännitettä. Vikatilanteessa nollajännite nousee merkittävästi. Nollajännitteen suuruus riippuu vikavastuksen (R_f) suuruudesta. Suorassa maasulussa vikavastuksen ollessa 0Ω , nollajännite on suurimmillaan vaihejännitteen suuruinen ja vikaantuneen vaiheen vaihejännite putoaa 0 V :iin. Tällöin kahden muun vaiheen vaihejännite kasvaa pääjännitteen suuruiseksi (**Kuva 2.**). Kuvaan 2 on merkitty katkoviivoin normaalitilanteen jännitteet.



Kuva 2. Vaihejännitteiden osoitindigrammit. Vasemmalla puolella normaali tilanne ja oikealla puolella L3 on maasulussa ja vikavastus on 0Ω . /1/

Vikavastuksen ollessa suurempi kuin 0Ω , voidaan nollajännitteen suuruus laskea kaavasta:

$$U_o = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} * I_E * R_f}{U}\right)^2}} \quad (3)$$

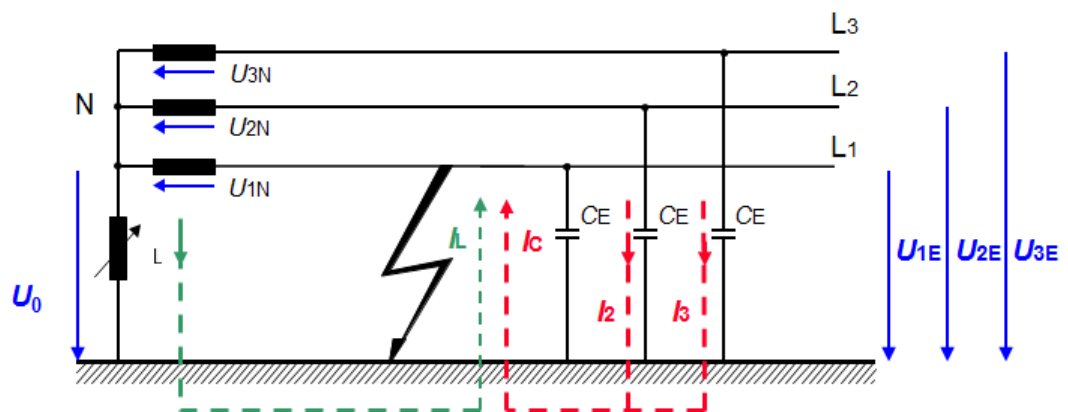
Nollajännitteen ohella muodostuu myös nollavirtaa (I_o). Koska maasulkutilanteessa maasulkuvirta on kapasitiivista, ovat vaihevirrät vaihejännitteitä 90° edellä. Maasulkuvirta on vaihevirtojen osoittimien summa ja nollavirta (I_o) on vaihevirtojen summan keskiarvo. /1/

2.2 Maasulku kompensoidussa sähköverkossa

Kompensoitu verkko eroaa maasta erotetusta verkosta siten, että kompensoidussa verkossa päämuuntajan tähtipiste on maadoitettu kompensointikuristimen kautta. Kompensointikuristimella pyritään pienentämään maasulkuvirtoja ja kosketusjännitteitä. Kompensoinnin periaatteena on kumota vaihejohtojen maakapasitanssien reaktanssit vastaavan suuruisella induktiivisella reaktanssilla. Kompensoidussa

sähköverkossa saavutetaan pienemmät maasulkuvirrat kuin maasta erotetussa sähköverkossa, mikä mahdollistaa sähköjakelun jatkumisen maasulun aikana. Kompensoinnin etuja ovat: /1/

- Henkilöturvallisuus pienien kosketusjännitteiden ja virtojen takia
- Vian itsestään sammuminen → 70 – 80 % vioista ohimeneviä
- Sähkölaitteiden pienemmät vauriot vikapaikassa
- Suojamaadoituksen vaatimukset pienenevät maasta erotettuihin verkkoihin verrattuna.



Kuva 3. Virtojen kulkusuunnat yksivaiheisessa maasulussa kompensoidussa sähköverkossa. /1/

Kuvassa 3 on esitettyä vikavirtojen kulkureitit yksivaiheisessa maasulussa. Täysin kompensoituna kompensointikuristin tuottaa maasulussa yhtä suuren induktiivisen reaktanssin kuin sähköverkko tuottaa kapasitiivista reaktanssia, jolloin induktiivinen vikavirta (I_L) kumoaa täysin kapasitiivisen vikavirran (I_C). Tavallisesti kompensointikuristimen rinnalle laitetaan resistiivinen vastus maasulkusuojausta varten. Kyseinen rinnakkaisvastus kytketään tavallisesti piiriin vasta maasulkuvian synnyttyä, jotta saadaan lisättyä maasulkuvirran resistiivistä komponenttia. Näin vikatilanteessa havaitaan rinnakkaisvastuksen aiheuttama muutos vikavirran resistiivisessä komponentissa. /1/

Vikavirran amplitudi (I_{ef}) kompensoidussa verkossa voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$I_{ef} = \frac{U_v}{R_f + \frac{R_o + R_l}{1 + jR_o(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}}$$

, jossa U_v = vaihejännite (V)

R_f = vikaresistanssi (Ω)

R_o = verkon ja kuristimen häviöresistanssit (Ω)

R_l = lisäkuormitusresistanssi (Ω)

C_0 = maakapasitanssi per vaihe (F)

L = kuristimen induktanssi (H) (4)

Nollajännite (U_0) kompensoidussa verkossa voidaan laskea kaavasta:

$$U_0 = \frac{-(R_o + R_l)}{R_f + (R_o + R_l) + jR_f(R_o + R_l)(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})} \quad (5)$$

Kompensointikuristimen tulee olla säädettävä, koska sähköverkon maakapasitanssit vaihtelevat verkon kytkentätilanteesta johtuen. Kompensointikuristimen virityksellä tarkoitetaan kompensointiasteen säätämistä. Kompensointiaste määräytyy induktiivisen ja kapasitiivisen vikavirran suhteesta. /1/

$$K = \frac{I_L}{I_C}, \text{ jossa } K = \text{kompensointiaste} \quad (6)$$

Kompensointikuristin on viritetty resonanssiin eli kuristimen induktiivinen reaktanssi kumoaa täysin sähköverkon kapasitiivisen reaktanssin, kun kompensointiaste on tasan 1. Resonanssiin viritys olisi ideaali tilanne, koska vikavirrat olisivat silloin mahdollisimman pieniä ja maasulun seuraukset voitaisiin minimoida, mutta se ei sovellu epäsymmetrisiin sähköverkkoihin. Alikompensoidussa kuristimessa kompensointiaste on pienempi kuin 1, jolloin kompensoiva induktiivinen reaktanssi on pienempi kuin kapasitiivinen reaktanssi. Alikompensoitu verkko soveltuu laajoihin ja tiheään silmukoituihin sähköverkkoihin. Ylikompensoidussa kuristimessa kompensointiaste on suurempi kuin 1, jolloin kompensoitava kapasitiivinen reaktanssi on pienempi kuin kuristimen aiheuttama induktiivinen reaktanssi. Maasulkusuojauksen selektiivisyyden kannalta sähköverkko kannattaa joko yli-

tai alikompensoida. Jos verkko on viritetty resonanssiin, niin suojareleen vian havaitseminen perustuu vain virran resistiivisen komponentin mittaukseen. Paras selektiivisyys saavutetaan, kun verkko on yli- tai alikompensoitu, jolloin suojarele havaitsee virran resistiivisen komponentin lisäksi joko induktiivisen tai kapasitiivisen komponentin. /1,4/

2.3 Maasulkusuojaus

2.3.1 Relesuojaus

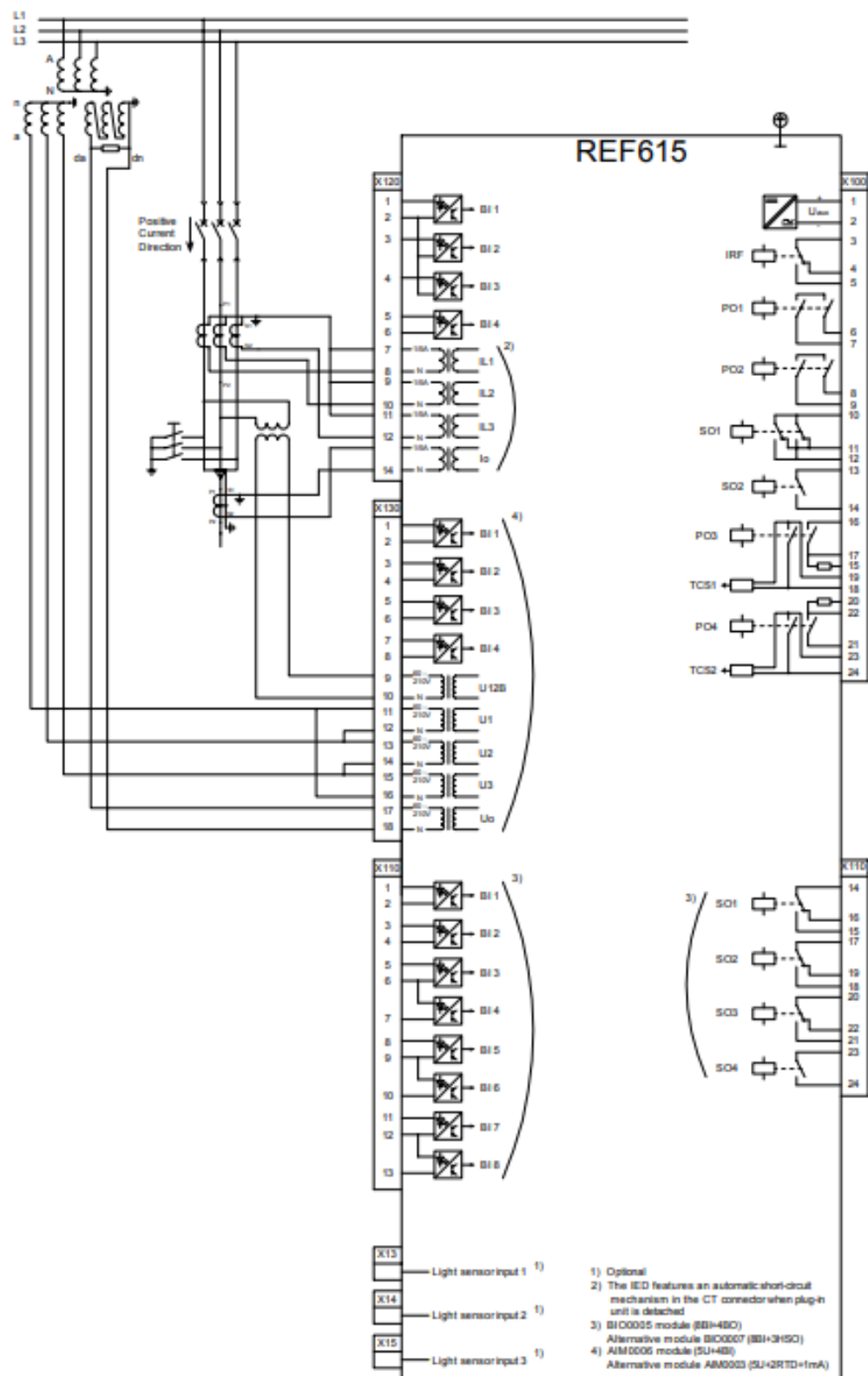
Maasulkusuojauksen tärkeimmät tehtävät ovat henkilövahinkojen minimointi ja sähköjakeluverkon toiminnan takaaminen. Maasulkusuojaus toteutetaan releillä ja on täten osa relesuojausta. Releillä varmistetaan sähköjakelun toiminta niin, että mahdollisimman moni asiakas saa sähköä vikatilanteiden aikaanakin. Releet valvovat koko ajan koko sähköverkon tilaa aukottomasti. Vian ilmaantuessa sähköverkkoon, releiden suojauksen tulee toimia siten, että se paikantaa ja rajaa vikapaikan, jotta vian aiheuttamat vahingot jäävät mahdollisimman pieniksi. Suomen sähköverkko on jaettu ns. suoja-alueisiin, joista kutakin suoja-aluetta suojataan releillä suojattavan kohteen vaatimusten mukaisesti. /2/

Nykyaikaiset releet ovat täysin ohjelmoitavia ja mikroprosessoripohjaisia sähkölaitteita. Releiden toiminta perustuu suojausfunktioihin. Suojausfunktioilla tarkoitetaan menetelmää, joka pääättelee sähköverkosta mitattujen suureiden perusteella, esiintyykö sähköverkossa häiriöitä. Suojausfunktioita on monenlaisia eri tarkoituksiin. Funktioita on erityyppisten vikojen havaitsemiseen, esimerkiksi ylivirran tai maasulkuvikojen, ja tietäntyyppiseenkin vikaan on useita eri laskentamenetelmiä käyttäviä suojausfunktioita. Suojausfunktioissa on tavallisesti hyvä joustavuus eli niiden asettelut ovat laajasti muokattavissa tilanteen vaatimalla tavalla. Suojausfunktioon asetettujen kriteerien täytyessä, rele tavallisesti joko irrottaa vikaantuneen osan verkosta tai vain varoittaa mahdollisesta häiriöstä, riippuen funktion asetteluista.

Jotta suojareleiden suojausfunktiot voisivat toimia, ne tarvitsevat informaatiota sähköverkon tilasta. Tarvittavat tiedot releet saavat mittauksilla. Releillä mitataan esimerkiksi seuraavia suureita:

- vaihevirtojen tehollisarvot (perusaalto ja yliaallot)
- maasulun summavirran tehollisarvo
- pääjännitteiden tehollisarvot (perusaalto ja yliaallot)
- nollajännitteen tehollisarvo
- kolmivaiheinen lähdön pätöteho, loisteho ja näennäisteho
- kuorman tehokerroin
- taajuus.

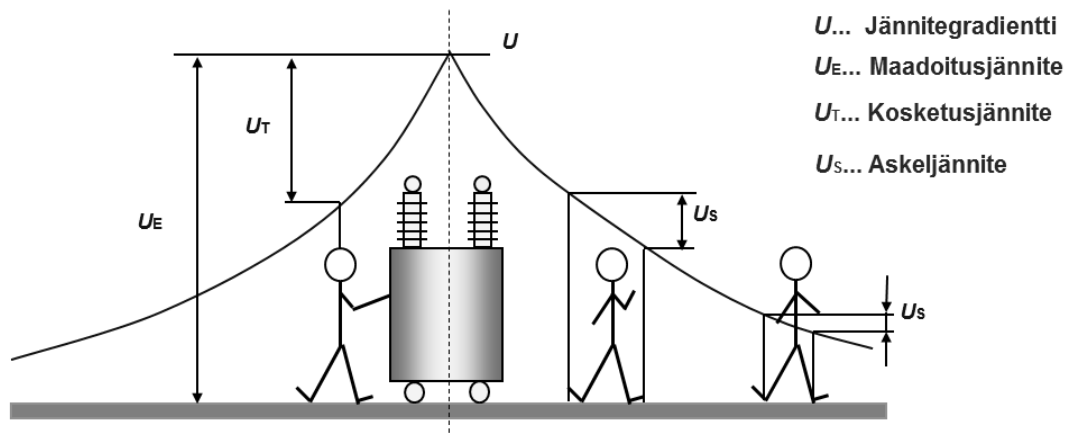
Virran mittauksiin käytetään vaihevirtamuuntajia tai kaapelivirtamuuntajia. Nollajännitettä mitataan jännitemuuntajilla avokolmiokytkennällä. Virta- ja jännitemuuntajien signaalit kytketään releellä mittausmoduuleihin. Kuvassa 4 on esimerkkitapaus releen moduulien kytkennöistä. /1, 2/



Kuva 4. Esimerkki mittausmoduulien kytkennöistä ABB REF615-releellä. /4/

2.3.2 Kosketusjännitteiden muodostuminen maasulussa

Maasulkusuojauksella pyritään ensisijaisesti välttämään henkilövahinkoja. Maasulun aikana vikapaikkaan muodostuu ihmiselle vaarallisia kosketus- ja askeljännitteitä. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan kosketeltavissa olevien johtavien osien välistä jännitettä. Askeljännitteellä tarkoitetaan kahden askelpituuden välein olevan maanpinnan pisteen välistä jännitettä. /3/

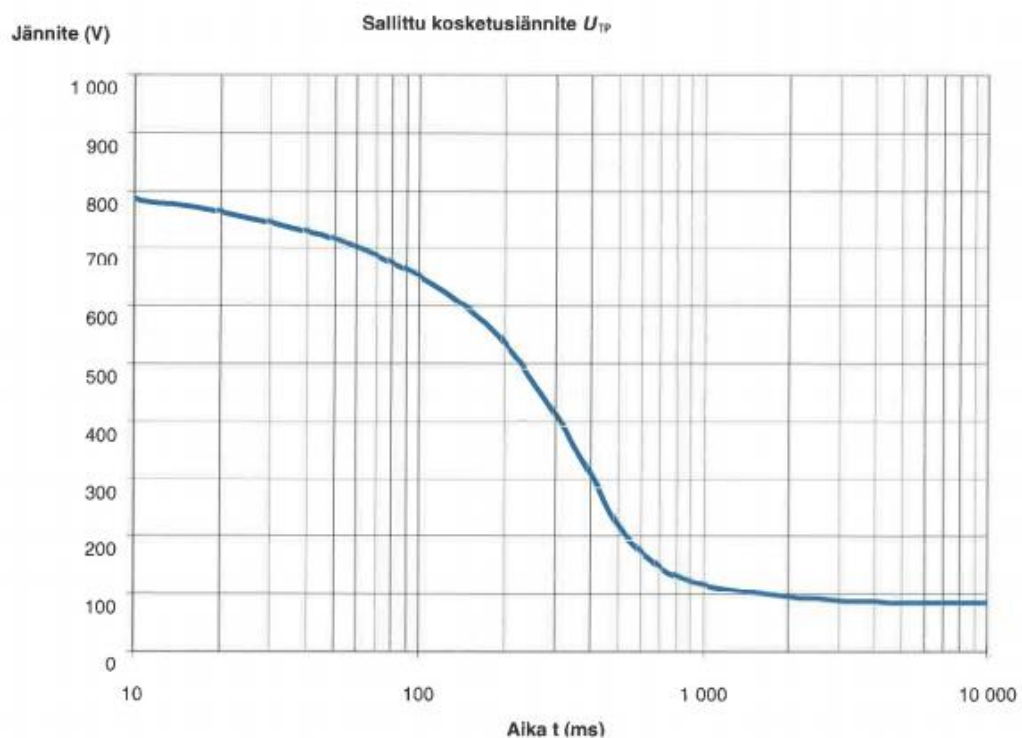


Kuva 5. Kosketusjännitteiden muodostuminen vikapaikassa. /1/

Kuvassa 5 nähdään miten kosketus- ja askeljännitteet muodostuvat maasulun ilmaantuessa. Henkilöön kohdistuu maasulkutilanteessa kosketusjännite (U_T), joka on vain osa maadoitusjännitteestä (U_E). Askeljännitteen suuruus riippuu siitä, kuinka kaukana henkilö sijaitsee vikapaikasta. Mitä lähempänä vikapaikkaa henkilö seisoo, sitä suurempi askeljännite kohdistuu henkilöön. /1/

Kosketusjännitteelle on asetettu rajoituksia jännitteen suuruudesta. Kosketusjännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa monella tavalla jo suunnitteluvaiheessa. Maasulkuvirtojen suuruus vaikuttaa myös kosketusjännitteiden suuruuteen. Pienentämällä maasulkuvirtoja, kosketusjännitteetkin pienenevät. Verkon rakenteella voidaan vaikuttaa maasulkuvirtojen suuruuteen. Esimerkiksi kompensoidussa verkossa, jossa muuntajan tähtipiste on maadoitettu kompensointikuristimen kautta, on pienemmät kosketusjännitteet kuin maasta erotetussa verkossa. Maadoitusjännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssilla. Maadoitusjännite saa olla suurimmillaan kaksi kertaa suurempi kuin

kosketusjännite. Maadoitusjärjestelmän impedanssia pienentämällä pienennetään maadoitusjännitettä. Henkilövahinkojen minimoinniksi pyritään myös pienentämään vian kestoaikaa. Vaarallisten kosketusjännitteiden kesto aikaan voidaan vaikuttaa maasulkusuojauksella. Releiden avulla erotetaan vikaantunut alue verkosta nopeasti. Erityisesti maasta erotetussa verkossa tulee olla nopeasti toimiva relesuojaus suurempien kosketusjännitteiden vuoksi. Kompensoidussa verkossa voidaan periaatteessa jatkaa sähkönjakelua maasulkutilanteissakin, jos kosketusjännitteet ovat tarpeeksi pieniä. Kuvassa 6 nähdään sallitun kosketusjännitteen rajat ajan funktiona. /1, 3/



Kuva 6. Sallittu kosketusjännite ajan funktiona. /3/

3 ADMITTANSSIPOHJAINEN MAASULKUFUNKTIO

Admittanssipohjaisessa maasulkufunktioissa laskenta perustuu nimensä mukaisesti admittanssin laskentaan. Admittanssi (Y) on impedanssin (Z) käänteisluku. Admittanssi koostuu impedanssin tapaan kahdesta osasta, reaalikomponentista ja imaginäärikomponentista. Admittanssin reaalikomponentti on konduktanssi (G) ja imaginäärikomponentti on suskeptanssi (B).

$$Y = G + jB$$

, jossa Y = admittanssi

G = konduktanssi

B = suskeptanssi (7)

Admittanssi voidaan laskea myös virran suhteesta jännitteeseen:

$$Y = \frac{I}{U}$$

, jossa I = virta

U = jännite (8)

Admittanssipohjainen maasulkusuojaus on alun perin kehitetty Puolassa. Admittanssiin pohjautuva maasulkusuojaus on todettu Puolassa niin hyväksi, että se on siellä standardisoitu maasulkusuojausfunktio /5/. Tässä työssä tutustutaan ABB REF615:lla toteutettavaan admittanssipohjaiseen maasulkusuojaukseen (EFPADM). Tämä on vaihtoehtoinen suojausfunktio perinteiselle nollavirtaan ja nol-lajännitteeseen perustuvalle maasulkusuojaukselle /4/.

3.1 EFPADM-funktio

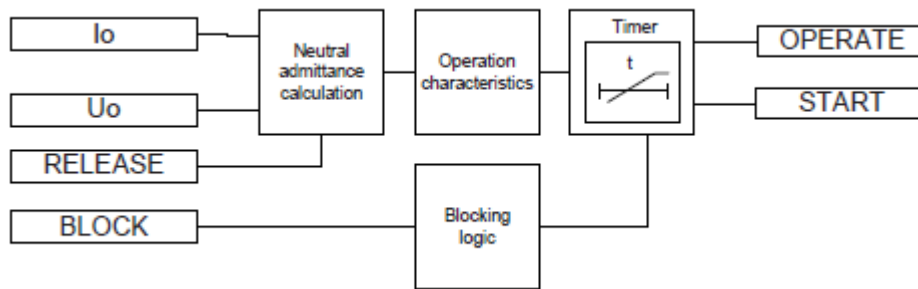
Admittanssipohjainen maasulkusuojausfunktio eli EFPADM (IEC61850). EFPADM-suojausfunktioita voidaan käyttää sekä maasta erotetuissa verkoissa että kompensoiduissa verkoissa. EFPADM-funktion hyviä puolia ovat monipuolisuus, herkkyyys ja helposti aseteltavat parametrit. /4/

EFPADM:n laskenta perustuu mitattuihin nollavirtaan (I_0) ja nollajännitteeseen (U_0). Funktion toiminta perustuu verkon nolla-admittanssin (Y_0) laskentaan nollavirran ja –jännitteen avulla seuraavan kaavan mukaan: /4/

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} = G_0 + jB_0 \quad (9)$$

EFPADM-suojausfunktion konfigurointi määrittää tilanteet, joissa releen halutaan toimivan. EFPADM-funktion mittaama admittanssi voidaan piirtää koordinaatistoon, jossa x-akselina on admittanssin reaali- eli konduktanssi (G_0) ja y-akselina on admittanssin imaginääri- eli susceptanssi (B_0). Funktion konfiguroinnilla pyritään rajaamaan koordinaatistoon alue, jonka ulkopuolella on releen toiminta-alue, jonne admittanssin arvo liikkuu maasulkutilanteessa viallisella johtolähdöllä. Tarkoituksena on jättää asetteluiden avulla rajatun alueen ulkopuolelle ne arvot, jotka admittanssi tai konduktanssi ja susceptanssi saavuttavat maasulun aikana viallisella johtolähdöllä. EFPADM:n asetteluilla määritetään myös suunta, jota rele tarkkailee koordinaatistossa. Suuntavaihtoehtoja on kolme, jotka ovat ”*forward*”, ”*reverse*” ja ”*non-directional*”. Forward-asettelulla releen on tarkoitus toimia, kun maasulkuvika ilmaantuu samalle johtolähdölle kuin missä rele sijaitsee. Reverse-asettelulla releen on tarkoitus toimia, kun maasulkuvika ilmaantuu eri johtolähdölle kuin missä rele sijaitsee eli taustaverkkoon. Non-directional-asettelulla ei määrätä tiettyä toimintasuuntaa lohkolle, vaan pystytään havaitsemaan missä tahansa suunnassa olevat maasulkuviat. Suuntausvaihtoehdot vaikuttavat siihen, miten alue rajautuu koordinaatistoon. /4/

Esimerkiksi non-directional asettelulla koordinaatistoon rajattu alue määritetään valitsemalla konduktanssin sallittu alue minimistä maksimiin ja susceptanssin sallittu alue minimistä maksimiin. Nämä asettelut muodostavat alueen, joka on suorakulmion muotoinen. Näiden parametrien ansiosta EFPADM-funktio on hyvin monipuolisesti aseteltavissa. Releen toiminta-alue saadaan muokattua eri tarpeisiin ja sovellutuksiin juuri tilanteen vaatimusten mukaisesti. /4/



Kuva 7. EFPADM-lohkon toimintaperiaate. /4/

Kuvasta 7 nähdään, miten EFPADM-lohko käsittelee tulosignaaleja. Mitatuista nollavirrasta ja nollajännitteestä lasketaan nolla-admittanssi. Jotta nolla-admittanssin laskenta käynnistyisi, pitää mitatun nollajännitteen ylittää asetteluissa määritetty ”voltage start value”. Nollajännitteen on tarkoitus ylittää ”voltage start value”-arvo pelkästään maasulun aikana. Koska nollajännitettä voi esiintyä verkon terveessä tilassa ja maasulun aikana nollajännite kasvaa, niin ”voltage start value” pitää määritellä siten, että nolla-admittanssin laskenta ei käynnisty terveessä tilassa. Kuvassa 7 näkyvällä ”RELEASE”-signaalilla voidaan myös ulkoisesti käynnistää nolla-admittanssin laskenta. Nolla-admittanssin laskentaa varten on kaksi asetteluvaihtoehtoa, joka valitaan ”Admittance Clc mode”-asettelusta. Oletusvaihtoehto tälle asettelulle on ”Normal”, joka laskee nolla-admittanssin kaavan 9 mukaan. Toinen vaihtoehto on ”Delta”-asetus, joka laskee nolla-admittanssin nollavirran ja nollajännitteen muutoksen suhteen. ”Delta”-asettelulla terveessä verkossa mitatut nollavirta ja –jännite vähennetään vikatilanteen nollavirrasta ja –jännitteestä kaavan 10 mukaisesti. ”Delta”-asettelun oikeanlainen toiminta vaatii ”RELEASE”-signaalin toimivan alle 0.1s vian syntyhetkestä, sillä muuten releen aikaisemmin mitatut nollavirran ja –jännitteen arvot ennen vikaa vaihtuvat vikatilanteen arvoihin, jolloin laskenta ei toimi kuten pitää. /4/

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_{0f} - \bar{I}_{0pf}}{-(\bar{U}_{0f} - \bar{U}_{0pf})} = \frac{d\bar{I}_0}{d\bar{U}_0}$$

, jossa \bar{I}_{0f} = nollavirta vian aikana

\bar{I}_{0pf} = nollavirta ennen vikaa

U_{0f} = nollajännite vian aikana

U_{0pf} = nollajännite ennen vikaa (10)

”Delta”-asettelulla verkossa mahdollisesti esiintyvät nollavirta ja nollajännite ennen vikatilannetta poistetaan nolla-admittanssin laskennasta, jolloin vikavastuksen ei pitäisi vaikuttaa nolla-admittanssin suuruuteen. Tämä asettelu myös pienentää mahdollisia mittausvirheitä, jolloin saavutetaan paras suojauksen toimintatarkkuus. ”Delta”-asettelua suositellaan käytettäväksi sähköverkoissa, joissa on paljon epäsymmetriaa tai nollavirran mittaus on toteutettu summavirtamittauksella. Suositellaan myös sovellutuksiin, joissa vaaditaan paljon tarkkuutta. /4/

Nolla-admittanssin laskennan jälkeen rele vertaa laskettua nolla-admittanssin arvoa valitun toimintakarakteristiikan mukaan. Toimintakarakteristiikka-asettelulla määritetään miten releen halutaan toimivan. Tällä asettelulla määritetään, minkä tyyppinen alue rajataan admittanssitason xy-koordinaatistoon, jossa admittanssi saa liikkua terveen tilan aikana. Etukäteen tiedetään miten verkon admittanssi tulee käyttäytymään erityyppisten vikojen aikana, ja vielä tarkemmin tiedetään miten admittanssin muodostavat konduktanssi ja susceptanssi käyttäytyvät maasulkuvian aikana. /4/

Jos sähköverkkoon tulee maasulkuvika releellä suojatun johtolähdön ulkopuolelle eli taustaverkkoon, kutsutaan tätä vikaa ns. ”reverse”-viaksi. Tämän tyyppisessä maasulkuviaassa tiedetään nolla-admittanssin käyttäytyvän seuraavanlaisesti maa-
doitustavasta riippumatta:

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{Fdtot} \approx -j \frac{I_{EFd}}{U_v}$$

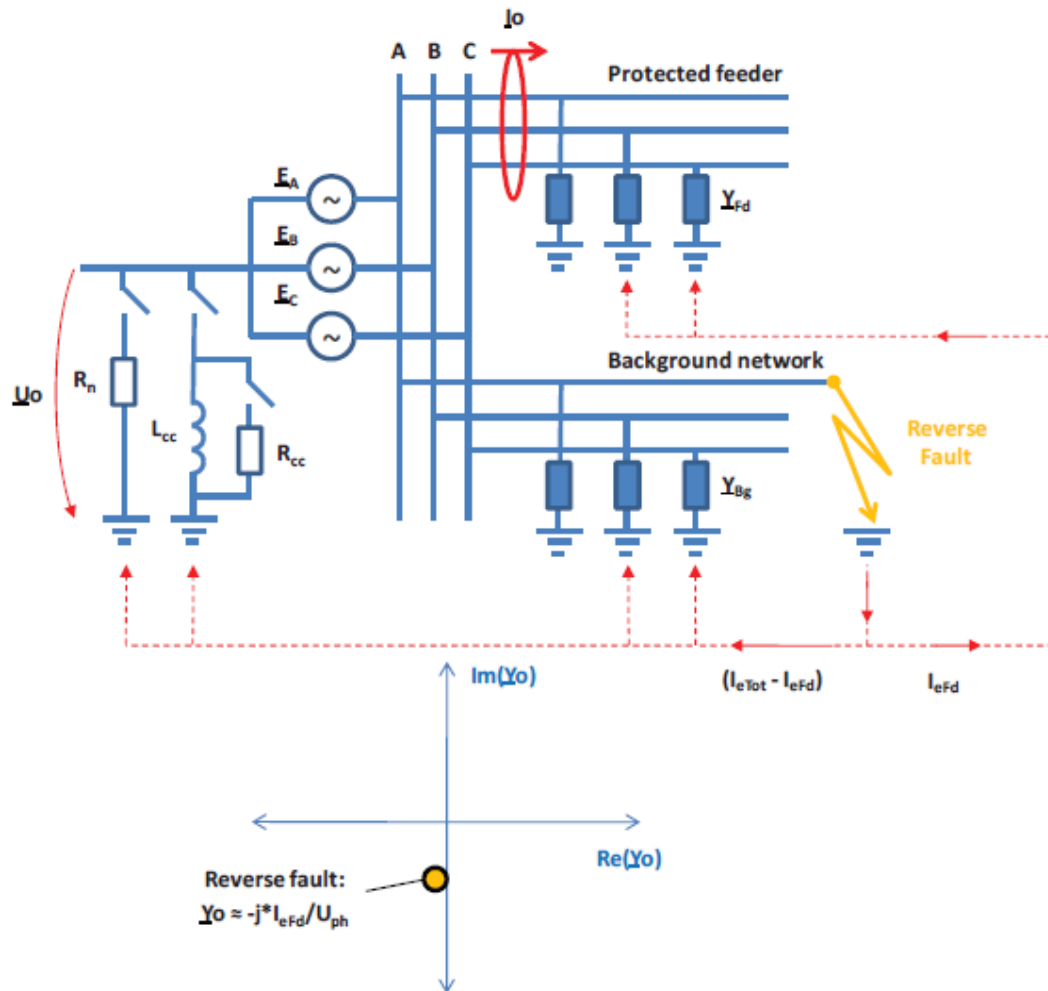
, jossa \bar{Y}_{Fdtot} = vaiheadmittanssien summa suojatussa lähdössä

I_{EFd} = suojattavan lähdön tuottama maasulkuvirta, kun vikavastus on 0Ω

U_v = nimellisivaihejännite (11)

Kaavan 11 mukaan releellä suojatun johtolähdön ulkopuolella tapahtuvissa maasulkuvioissa releen näkemän nolla-admittanssin arvo on sama kuin nolla-admittanssin arvo suojatussa lähdössä, mutta se on negatiivinen. Releen näkemäs-

sä admittanssin arvossa resistiivinen komponentti on erittäin pieni, sillä se koostuu vain suojattavan lähdön vuotoresistanssista. Mitattu nolla-admittanssi on lähes täysin induktiivista, jolloin nolla-admittanssin arvo koostuu lähes täysin negatiivisesta susceptanssista ja sijoittuu koordinaatistossa kolmanteen neljännekseen lähelle imaginääriakselia eli y-akselia. Kuvasta 8 nähdään miten nolla-admittanssi sijoittuu xy-koordinaatistoon, kun maasulkuvika sijaitsee taustaverkossa. /4/



Kuva 8. Nolla-admittanssin sijoittuminen xy-koordinaatistossa, kun maasulkuvika sijaitsee taustaverkossa. /4/

Jos sähköverkkoon ilmaantuu maasulkuvika releen etupuolelle eli sen suojaamaan johtolähtöön, kutsutaan tätä vikaa ns. ”forward”-viaksi. Tässä vikatyypissä nolla-admittanssin arvo vaihtelee riippuen sähköverkon syöttömuuntajan maadoitusta-

vasta. Nolla-admittanssi muodostuu maasta erotetussa verkossa ja kompensoidussa verkossa seuraavanlaisesti:

Maasta erotettu sähköverkko:

$$\bar{Y}_0 = \bar{Y}_{Bgtot} \approx j \left(\frac{I_{etot} - I_{EFd}}{U_v} \right) \quad (12)$$

Kompensoitu sähköverkko:

$$\bar{Y}_0 = \bar{Y}_{Bgtot} + \bar{Y}_{CC} \approx \frac{I_{Rf} + j(I_{etot} * (1-K) - I_{EFd})}{U_v} \quad (13)$$

, jossa \bar{Y}_{Bgtot} = vaiheadmittanssien summa taustaverkossa

\bar{Y}_{CC} = kompensointikuristimen ja rinnakkaisvastuksen admittanssi

I_{Rf} = rinnakkaisvastuksen nimellisvirta

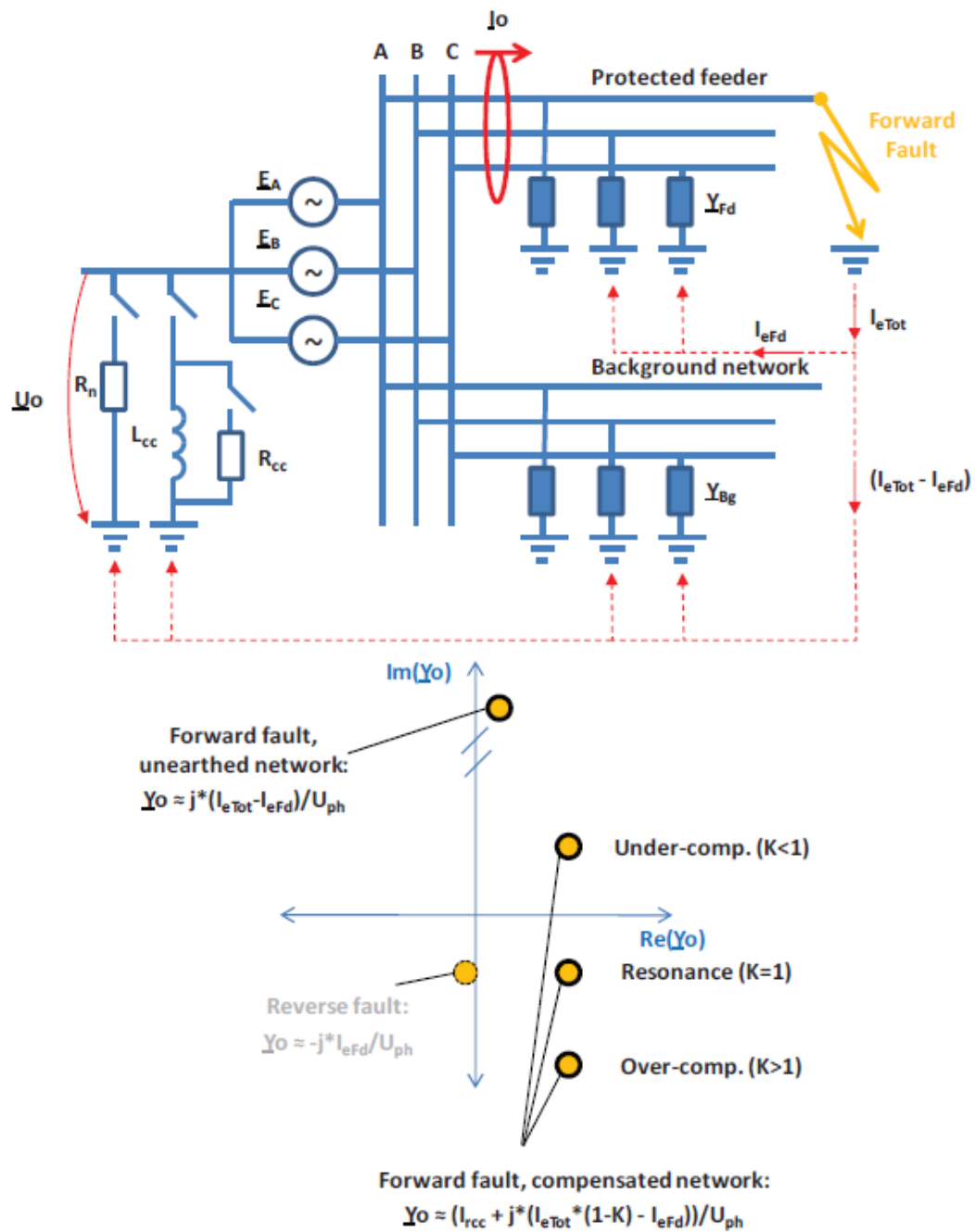
I_{etot} = kokonaisvikavirta maasta erotetussa verkossa, kun vikavastus on 0Ω

K = kompensointiaste

Kun maasulkuvika on releen suojaamassa johtolähdössä, kaavan 12 mukaan maasta erotetussa verkossa mitattu nolla-admittanssi on yhtä suuri kuin taustaverkon tuottama admittanssi. Maasta erotetussa verkossa on ”forward”-viassa resistiivinen komponentti eli konduktanssi samaan tapaan kuin ”reverse”-viassa hyvin pieni. Imaginäärikomponentti on taas päinvastaisesti kapasitiivinen, jolloin nolla-admittanssin arvo oletetusti asettuu xy-koordinaatistossa ensimmäiseen neljännekseen lähelle imaginääriakselia. /4/

Kaavasta 13 nähdään kuinka kompensoidussa verkossa maasulun ilmaantuessa releellä suojattuun johtolähtöön, mitattu nolla-admittanssi muodostuu taustaverkon vaiheadmittanssien summan lisäksi vielä kompensointikuristimen ja rinnakkaisvastuksen aiheuttamasta admittanssista. Kompensoidussa verkossa saadaan rinnakkaisvastuksella aikaan suurempi resistiivinen komponentti eli konduktanssi vian aikana. Rinnakkaisvastus on lisätty kompensointikuristimen rinnalle ja se kytketään maasulkuvian tapahduttua varta vasten maasulkusuojausta varten, jotta releet havaitsevat sähköverkossa olevan maasulkuvian. Imaginäärikomponentti

määräytyy kompensoidussa verkossa kompensointikuristimen kompensointiasteen ja suojattavan lähdön tuottaman maasulkuvirran mukaan. Alikompensoituna susceptanssi on positiivinen ja tällöin nolla-admittanssin arvo sijoittuu xy-koordinaatistossa ensimmäiseen neljännekseen. Ylikompensoituna susceptanssi on päinvastaisesti negatiivinen, jolloin nolla-admittanssin arvo sijoittuu koordinaatistossa neljänteen neljännekseen. Kuvasta 9 nähdään miten admittanssi sijoittuu xy-koordinaatistossa sekä maasta erotetussa verkossa että kompensoidussa verkossa. /4/



Kuva 9. Mitatun nolla-admittanssin sijoittuminen xy-koordinaatistoon, kun maa-sulkuvika on suojatulla johtolähdöllä. /4/

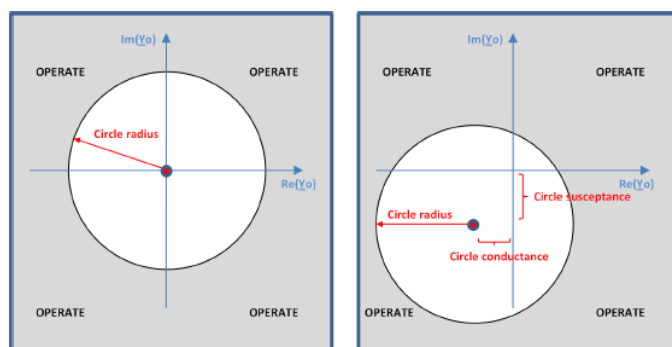
3.2 Toimintakarakteristiikat

Toimintakarakteristiikalla valitaan alue koordinaatistossa, jolla sähköverkon nolla-admittanssin sallitaan sijaitsevan terveen tilan aikana. Nolla-admittanssin laskennan jälkeen EFPADM-lohko vertaa tätä laskettua nolla-admittanssin arvoa

asetetun toimintakarakteristiikan raja-alueisiin. Jos nolla-admittanssi sijoittuu rajatun alueen ulkopuolelle koordinaatistossa, niin lohkon toimintalogiikka lähettää signaalin eteenpäin ajastimelle, joka näkyy toimintalohkokaaviossa kuvassa 7. /4/

Toimintakarakteristiikan parametreissa valitaan ensiksi karkeasti minkä muotoinen raja-alue halutaan asetteluilla ”Operation mode” ja ”Directional mode”. Operation modella valitaan releen toimintakriteerit. Näitä vaihtoehtoja on yhteensä seitsemän, joita ovat Y_o , B_o , G_o ja näiden kolmen kriteerien eri yhdistelmät. ”Directional mode”-asettelulla valitaan releen toimintasuunta, jossa vaihtoehtoina ovat forward, reverse ja non-directional. Operation moden ja Directional moden valintojen jälkeen asetetaan tarkemmat raja-arvot. /4/

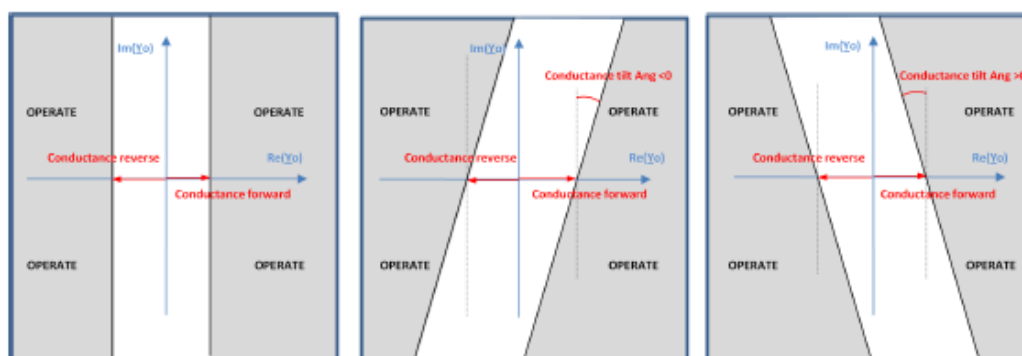
Y_o -asettelu tarkoittaa, että määritetään kokonaisadmittanssiin perustuva raja-alue. Jos releen mittaama kokonaisadmittanssi ylittää asetetun arvon, rele laukaisee. Koordinaatistoon Y_o -asettelu asettaa ympyrän muotoisen alueen, jonka kokoa muokataan asettelemalla ympyrän säde ja sijaintia voidaan muokata siirtämällä ympyrän keskipistettä koordinaatistossa. Kuvasta 10 nähdään minkälaisen alueen Y_o -karakteristiikka muodostaa koordinaatistoon. /4/



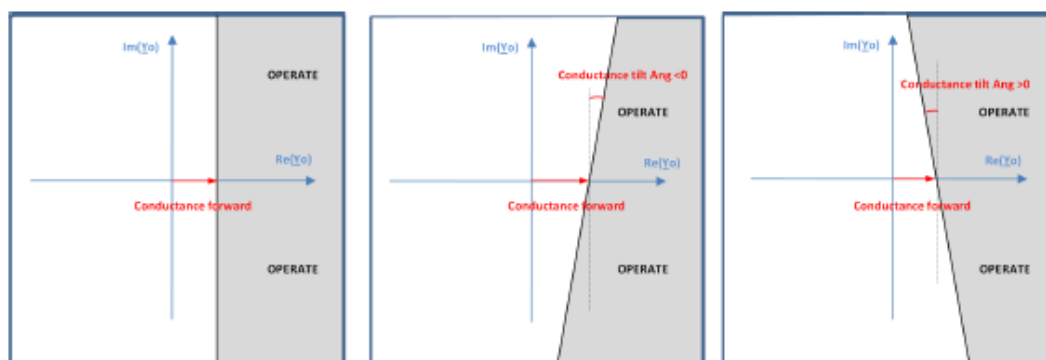
Kuva 10. Y_o -karakteristiikka. Vasemmalla keskipiste on asetettu origoon ja oikealla puolella keskipiste on siirretty kolmanteen neljännekseen. /4/

G_o -karakteristiikan toiminta perustuu lasketun admittanssin reaali-osan eli konduktanssin suuruuteen. G_o -asettelulla parametroidaan alueeseen vain konduktanssin ylä- ja alaraja. G_o -karakteristiikan muodostama alue koordinaatistossa on imaginääriosan eli susceptanssin suuntiin ääretön ja toiminta-alueet sijaitsevat siten, että konduktanssin ylittäessä ylärajan tai alittaessa alarajan, rele laukaisee.

”Directional mode”-asettelulla määritetään suunta, jolloin rele laukaisee. ”Forward”-asettelulla rele toimii vain konduktanssin raja-arvon ylittyessä. ”Reverse”-asettelulla rele toimii vastaavasti konduktanssin raja-arvon alittuessa. ”Non-directional”-asettelulla rele saadaan toimimaan molempiin suuntiin, kun konduktanssi ylittää asetetun ylärajan tai alittaa asetetun alarajan. Alueen kulmaa voidaan myös säätää jos sovellutus sitä vaatii. Go-asettelu ei sovellu maasta erotettuihin verkkoihin, koska maasulkuviassa maasta erotetuissa verkoissa lähes täysin reaktiivisessa virrassa konduktanssin arvo pysyttelee lähellä nollaa. Kuvassa 11 on esitetty Go-karakteristiikan muodostaman alueen muoto ”non-directional”-asettelulla ja kuvassa 12 kuinka toiminta-alue muodostuu forward-asettelulla. /4/



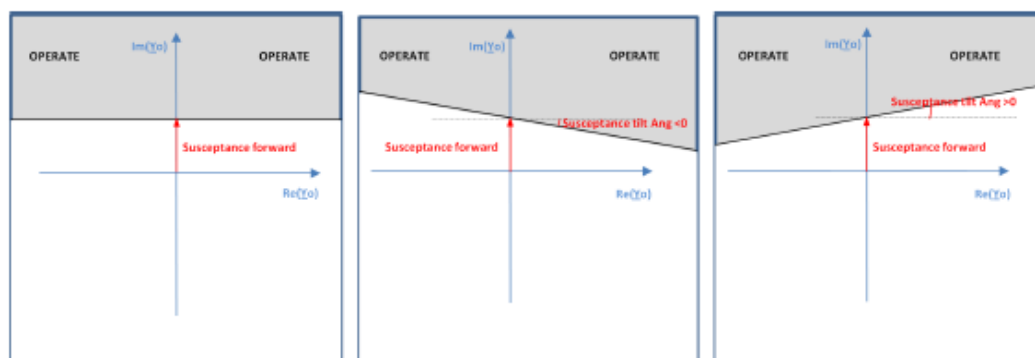
Kuva 11. Go-karakteristiikka non-directional-asettelulla ja kulman muuttamisen vaikutus alueen muotoon. /4/



Kuva 12. Go-karakteristiikka forward-asettelulla ja kulman vaikutus alueen muotoon. /4/

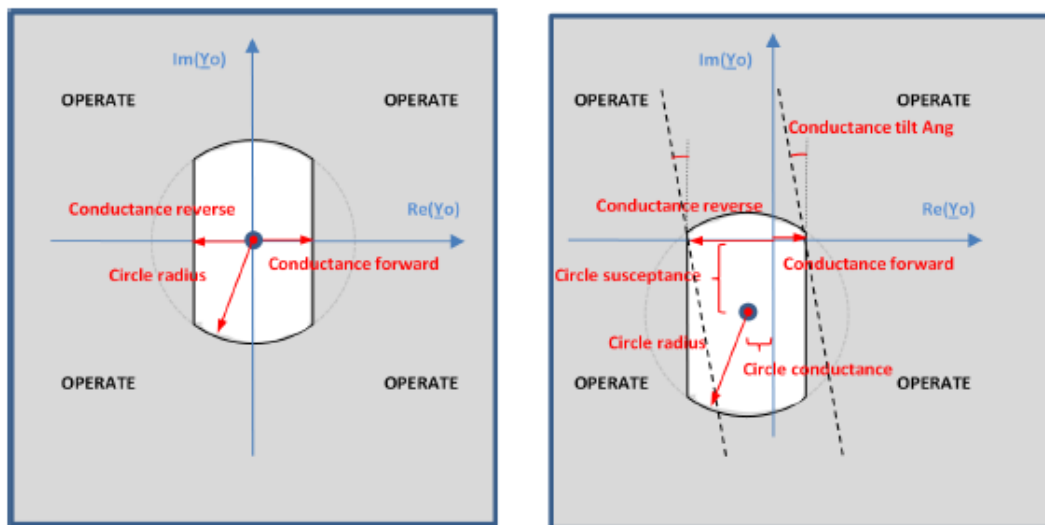
Bo-karakteristiikan toiminta perustuu susceptanssin suuruuteen. Susceptanssin ylittäessä tai alittaessa määritetyt rajapisteet, rele laukaisee. Directional modelilla valitaan suuntaus releen toiminta-alueelle. Bo-karakteristiikka toimii vastaavasti

suskeptanssin perusteella kuin Go-karakteristiikka toimii konduktanssin perusteella. ”Forward”-asettelulla toiminta-alue sijaitsee vain susceptanssin raja-arvoa suuremmilla arvoilla ja ”reverse”-asettelulla toiminta-alue sijaitsee susceptanssin raja-arvoa pienemmilla arvoilla. ”Non-directional”-asettelulla rele toimii susceptanssin ylittäessä ylärajan tai alittaessa alarajan. Kuvasta 13 nähdään esimerkkinä forward-asettelulla Bo-karakteristiikan muodostama alue koordinaatistoon. /4/



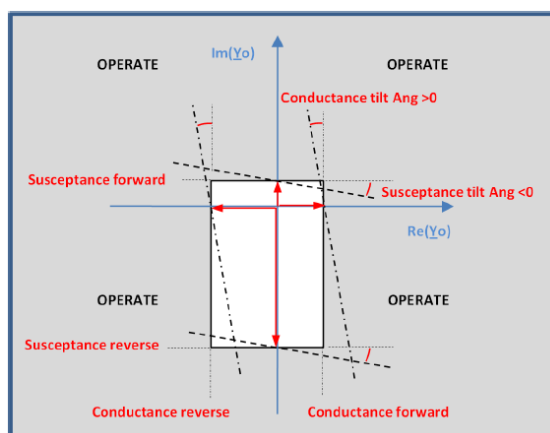
Kuva 13. Bo-karakteristiikan toiminta-alue forward-asettelulla ja kulman vaikutus alueen muotoon. /4/

Operation modeksi voidaan valita näiden kolmen karakteristiikan lisäksi vielä näiden yhdistelmät, jotka ovat Y_0 & Go , Y_0 & Bo , Go & Bo ja vielä nämä kaikki kolme sisältävä Y_0 & Go & Bo . Näillä yhdistelmäasetteluilla valitaan mihin suuriin releen toiminta perustuu ja miten xy-koordinaatistoon rajattu alue muodostuu. Y_0 -asetus tarkkailee admittanssia eli konduktanssin ja susceptanssin summan itseisarvoa. Go -asetus tarkkailee konduktanssia ja Bo -asetus tarkkailee susceptanssia. Näillä yhdistelmäasetteluilla pystytään takaamaan riittävä monipuolisuus ja herkkyys releen toiminta-alueeseen. Esimerkiksi pelkällä Y_0 -asettelulla saadaan koordinaatistoon ympyränmuotoinen alue, joka keskipisteeseen asetettuna vertaa vain verkon admittanssin itseisarvoa. Yhdistämällä Y_0 -asettelun lisäksi joko Go - tai Bo -asettelun, releen herkkyys nousee rajoittamalla konduktanssin tai susceptanssin sallittua arvoa. Kuvassa 14 nähdään kuinka Go -karakteristiikan lisääminen Y_0 -karakteristiikkaan mahdollistaa herkemman toiminta-alueen pienentämällä rajatun alueen pinta-alaa. /4/



Kuva 14. "Yo,Go"-asettelun karakteristiikka. /4/

"Go, Bo"-karakteristiikalla tarkkaillaan verkon konduktanssin ja susceptanssin tilaa, kun pelkällä Go- tai Bo-karakteristiikalla releen toiminta-alue valittiin vain konduktanssin tai susceptanssin perusteella. "Go, Bo"-karakteristiikalla toiminta-alueeseen valitaan rajat sekä konduktanssin että susceptanssin arvoihin. Suuntaamalla Go, Bo-karakteristiikan forward tai reverse suuntaan, valitaan toiminta-alueeseen konduktanssille ja susceptanssille yhdet raja-arvot, jolloin rele toimii, suuntauksesta riippuen, näiden arvojen ylittyessä tai alittuessa. Valitsemalla "Go, Bo"-karakteristiikkaan non-directional suuntauksen, valitaan sekä konduktanssille että susceptanssille kahdet raja-arvot, jolloin koordinaatistoon muodostuu suorakulmion muotoinen alue. Kuvassa 15 nähdään non-directional-asettelu "Go, Bo"-karakteristiikassa. /4/



Kuva 15. "Go, Bo"-karakteristiikka non-directional asettelulla. /4/

Toimintakarakteristiikan valintaan vaikuttaa sähköverkon maadoitustavan rakenne. Koska maadoitustavan rakenne vaikuttaa maasulkuvian aikana mitattuihin ja laskettuihin suureisiin, tulee valita verkolle sopiva toimintakarakteristiikka. Maasta erotetussa sähköverkossa maasulkuvian aikana mitattu admittanssi koostuu lähes täysin susceptanssista eli imaginäärikomponentista, jolloin ei voida käyttää karakteristiikkoita, joiden toiminta-alue sijaitsee kaukana imaginääriakselista. Esimerkiksi "Go"-karakteristiikka ei sovi maasta erotettuihin verkkoihin, koska sen toiminta perustuu konduktanssin suuruuteen. Kompensoiduissa verkoissa maasulkuvian aikana mitattu admittanssi sisältää suuren resistiivisen komponentin kompensointikuristimen rinnakkaisvastuksen takia, mutta kompensoinnin takia imaginäärikomponentti on pienempi. Tämän takia kompensoiduissa verkoissa ei voida käyttää karakteristiikkaa, jonka toiminta-alue sisältää suuren imaginääriosan. Esimerkiksi "Bo"-karakteristiikka ei sovellu tästä syystä kompensoituihin sähköverkkoihin. /4/

4 FUNKTION ASETTELUIDEN LASKENTA

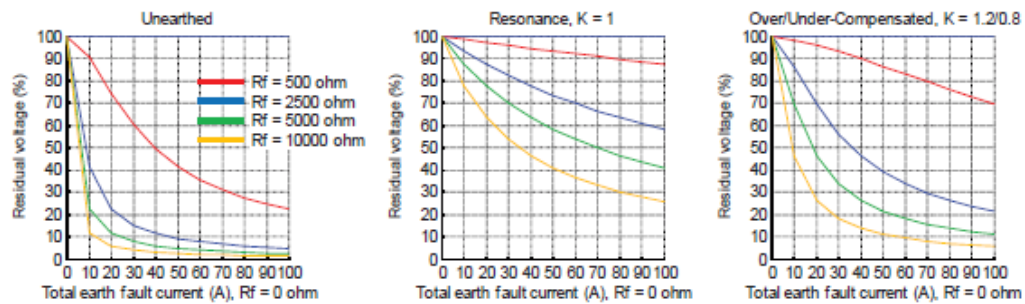
Sähköverkon maasulkusuojausta suunnitellessa tulee tietää miten verkko käyttäytyy maasulkutilanteessa. Valitun suojausfunktion asettelut mitoitetaan siten, ettei rele laukaise terveessä tilassa, esimerkiksi mittausvirheiden takia. Releen toimintaan vaikutetaan suuntauksella ja toimintakarakteristiikalla, jolloin saadaan haluttu suojaus.

4.1 EFPADM-asetteluiden laskenta

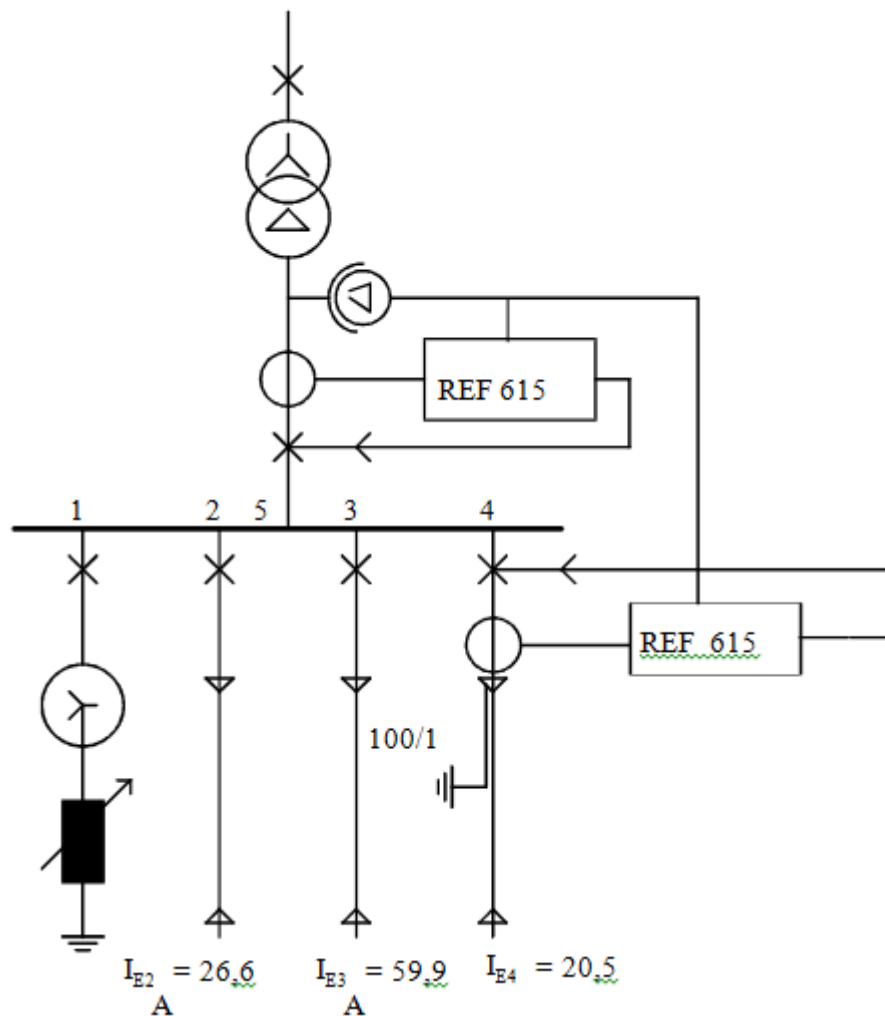
Funktion toiminta alkaa, kun mitattu nollajännite ylittää parametreissa asetetun *voltage start value* arvon. ”Voltage start value” tulee asettaa siten, että se on enemmän kuin mahdollinen nollajännitteen arvo terveessä tilassa sopivalla marginaalilla. Nollajännitteen terveen tilan maksimiarvon lisäksi verkosta tulee tietää seuraavat asiat, jotta voidaan laskea admittanssin raja-arvot toimivan suojauksen takaamiseksi:

- Suojatun johtolähdön tuottama suurin vikavirran suuruus, kun vikaresistanssi on 0Ω
- Koko järjestelmän kompensoimaton vikavirta, kun vikaresistanssi on 0Ω
- Kompensoiduissa sähköverkoissa tulee tietää kompensointikuristimen rinnakkaisvastuksen nimellisvirran arvo
- Nollajännitteen käyttäytyminen vikaresistanssin funktiona.

”Voltage start value”-asettelun varmistamiseksi tulee tietää kuinka nollajännite käyttäytyy vikaresistanssin funktiona. Kuvassa 16 nähdään esimerkkinä vikaresistanssin vaikutus nollajännitteeseen 20 kV:n sähköverkoissa. /4/



Kuva 16. Vikaresistanssin vaikutus nollajännitteeseen 20kV:n sähköverkoissa. /4/



Kuva 17. 20kV:n jakeluverkkomalli, jota käytetään EFPADM-funktion tutkimiseen. /2/

Kuvassa 17 on esitetty 20kV:n jakeluverkon malli, jota käytetään EFPADM-funktion tutkimiseen. Kuvassa on esitetty jokaisen johtolähdön tuottama maasulkuvirta. Asetteltu on tarkoitus laskea releelle, joka suojaa johtolähtöä 4. Asetteltu

lasketaan EFPADM-funktiolle maasta erotetulle verkolle, kompensoidulle verkolle ja muuttuvan maadoitustavan eli kompensoidusta maasta erotettuun verkkoon vaihtuvalle verkolle.

4.2 Asetteluiden laskenta maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa verkossa nollajännitteen arvo verkon terveessä tilassa on tyypillisesti korkeintaan $1\% \cdot U_v$. Tästä syystä ”*voltage start value*” tulee olla sopivalla marginaalilla suurempi kuin $0,01 \cdot U_v$. Esimerkiksi kuvan 16 perusteella sopiva arvo korkeintaan 2500Ω :n vikaresistanssilla olisi $0,05 \cdot U_v$. Jotta saavutettaisiin parempi herkkyys, yli 3200Ω :n vikavastusta varten sopiva asettelu on $0,03 \cdot U_v$. Maasta erotetussa verkossa maasulkuvian aikana admittanssin arvo sijoittuu koordinaatistossa hyvin lähelle imaginääriakselia, koska maasta erotetussa verkossa vuotohäviöistä johtuva resistiivinen komponentti on erittäin pieni. Näin ollen toimintakarakteristiikkaa valittaessa maasta erotettuun verkkoon konduktanssin raja-arvot eivät ole merkittävässä osassa, joten raja-arvot tulee valita susceptanssin tai kokonaisadmittanssin mukaan. /4/

Yo-toimintakarakteristiikkaa voidaan käyttää maasta erotetuissa verkoissa. Tämä karakteristiikka muodostaa koordinaatistoon ympyrän muotoisen rajatun alueen, jonka ulkopuolella on releen toiminta-alue. Kun admittanssin arvo ylittää määrätyn rajan, rele laukaisee. Raja-arvoja aseteltaessa tulee sähköverkosta tietää sen järjestelmän suurimman mahdollisen yksivaiheisen maasulkuvikavirran suuruus (I_{etot} , $R_f=0\Omega$) ja releellä suojatun johtolähdön tuottaman maasulkuvirran suurin mahdollinen arvo (I_{EFd}). Kuvan 17 mallin 20kV:n maasta erotetun sähköverkon I_{etot} on 107 A ja johtolähdön I_{EFd} on 20,5 A. Saadaan 20,5 A:n vikavirtaa vastaava admittanssin arvo seuraavasti: /4/

$$\bar{Y}_{\text{Fdtot}} = \frac{20,5A}{20kV/\sqrt{3}} \approx j * 1,78 \text{ mS} \quad (20)$$

Taustaverkkoon syntyneessä maasulkuviassa (reverse) rele näkee admittanssin arvon kaavan 11 mukaisesti, jossa $Y_0 = -Y_{\text{Fdtot}}$ eli $-j * 1,78 \text{ mS}$. Jos vika tulee releen suojaamalle johtolähdölle (forward), niin rele näkee 107A-20,5A suuruisen

vikavirran eli 86,5A:n admittanssin kaavan 12 mukaisesti. Tällöin admittanssiksi tulee: /4/

$$\bar{Y}_0 = \frac{107A - 20,5A}{20kV/\sqrt{3}} \approx j * 7,49 \text{ mS} \quad (21)$$

Yo-toimintakarakteristiikassa asetellaan koordinaatistoon muodostuvan ympyrän säde. Tiedetään, että ”reverse”-viassa admittanssi on $-j*1,78 \text{ mS}$ ja ”forward”-viassa admittanssi on $j*7,49 \text{ mS}$. Jotta rele ei laukaise taustaverkkoon syntyneen maasulkuvian takia, tulee admittanssin raja-arvoksi asetella suurempi kuin $1,78 \text{ mS}$, mutta pienempi kuin $7,49 \text{ mS}$. Suositeltava marginaali asettelulle olisi vähintään $1,5*1,78 \text{ mS} = 2,67 \text{ mS}$. Taulukossa 1 on esitettynä asettelut kokonaisuudessaan maasta erotetulle verkolle. /4/

Taulukko 1. Esimerkkiasettelut maasta erotetulle verkolle EFPADM-funktiossa.

| | |
|---------------------|----------|
| Operation mode | Yo |
| Voltage start value | 0,03 xUn |
| Circle radius | 2,67 mS |

4.2.1 Asetteluiden laskenta kompensoidussa verkossa

Kompensoidussa sähköverkossa maasulkuviassa kytketään kompensointikuristimen rinnalle rinnakkaisvastus, joka muodostaa releen mittaamalle admittanssille myös resistiivisen komponentin. Nollajännite voi olla kompensoiduissa verkoissa terveessä tilassa jopa 30 % nimellisvaihejännitteestä, jos sähköverkko sisältää suuria alueita ilman vaihepositioiden vaihtelua. /4/

20kV:n jakeluverkkomallin I_{tot} on 107A, I_E on 20,5A ja kompensointikuristimen rinnalle kytketään maasulkuviassa 10A:n rinnakkaisvastus. Jakeluverkkomallin nollajännite terveessä tilassa kompensoidussa verkossa on n. 0,005 xUn. Kuvan 16 perusteella voidaan valita voltage start valueksi esimerkiksi $0,10*Un$, joka takaa 5000Ω :n herkkyyden. 20,5A:n vikavirtaa vastaava admittanssi on sama kuin

aikaisemmassa kaavassa 20. Rinnakkaisvastuksen nimellisvirtaa 10A vastaava admittanssi on:

$$G_{CC} = \frac{10A}{20kV/\sqrt{3}} \approx 0,87 \text{ mS} \quad (22)$$

Taustaverkossa ilmaantuvassa maasulkuviassa releen mittaama admittanssi on $-j*1,78 \text{ mS}$. Suojatussa johtolähdössä ilmaantuvassa maasulkuviassa releen mittaama admittanssi rinnakkaisvastuksen kytkemisen jälkeen on $(0,87+j*B) \text{ mS}$, jossa B riippuu kompensointikuristimen viritysteesta. Kompensointiasteella ei ole toimintakarakteristiikan toiminnan kannalta merkitystä, koska kompensointiaste muuttaa vain imaginäärikomponentin arvoa ja rinnakkaisvastuksen muodostama resistiivinen komponentti on riittävän suuri releen toimintaa varten. /4/

Kompensoituihin sähköverkkoihin soveltuu useampi toimintakarakteristiikka. Esimerkkinä Go, Bo-karakteristiikka ”non-directional”-suuntauksella, jossa asetellaan sekä konduktanssille että susceptanssille raja-alueet. Tämä toimintakarakteristiikka muodostaa koordinaatistoon suorakulmion muotoisen alueen.

Konduktanssin yläraja tulee valita kompensointikuristimen rinnakkaisvastuksen muodostaman admittanssin mukaan. Ylärajan tulee olla pienempi sopivalla marginaalilla kuin rinnakkaisvastuksen admittanssin arvo, jotta vian ilmaantuessa suojatulle johtolähdölle admittanssin arvo on releen toiminta-alueella. Suositeltava marginaalin korjauskerroin on 0,2-0,7 riippuen rinnakkaisvastuksen nimellisvirrasta. Mitä suurempi rinnakkaisvastuksen virta on, sitä pienempi tulisi korjauskertoimen olla. Johtolähtömallin mukaisesti sopiva konduktanssin yläraja olisi täten $0,2*0,87\text{mS} = 0,18\text{mS}$. /4/

Susceptanssin yläraja tulisi valita oletuksena 1A vastaavan admittanssin mukaan. Sopiva susceptanssin yläraja olisi $1A/(20kV/\sqrt{3}) = 0,09 \text{ mS}$. Susceptanssin alaraja tulisi valita suojatun johtolähdön suurimman mahdollisen vikavirran admittanssin mukaan sopivalla marginaalilla, jotta rele ei laukaise taustaverkossa ilmaantuvan maasulkuvian vuoksi. Suositeltavan marginaalin olisi vähintään oltava 1,5. Johtolähtömallin suojatun johtolähdön suurin mahdollinen virta on 20,5A ja sen admittanssi on 1,78 mS. Susceptanssin alarajaksi valitaan täten $-(1,5*1,78$

mS) = $-2,67$ mS. Konduktanssin alarajan valinta täydentää lopulta suorakulmion, joka muodostuu koordinaatistoon. Jotta mitatulla admittanssilla olisi liikkumavaara taustaverkossa olevan maasulkuvian aikana, suositeltava asetus konduktanssin alarajalle on sama kuin susceptanssin alarajalle. Taulukossa 2 on esitettyä asettelut kokonaisuudessaan kompensoidulle verkolle. /4/

Taulukko 2. EFPADM-asettelut johtolähtömallille kompensoidussa verkossa.

| | |
|---------------------|--------------------------|
| Voltage start value | 0,10 xUn |
| Operation mode | Go, Bo (Non-directional) |
| Conductance forward | 0,18 mS |
| Conductance reverse | -2,67 mS |
| Susceptance forward | 0,09 mS |
| Susceptance reverse | -2,67 mS |

4.2.2 Laajakulma-asettelut

Kompensoiduissa sähköverkoissa maadoitustapa muuttuu, kun kompensointikuristin kytketään pois ja verkon tähtipisteestä tulee maasta erotettu. Tällaiseen sähköverkkoon voidaan rele asettaa siten, että sen asetteluja ei tarvitse muuttaa, kun maadoitustapa muuttuu, vaan se toimii molemmilla maadoitustavoilla. Tällaisille asetteluille käytetään nimeä ”laajakulma asettelut”.

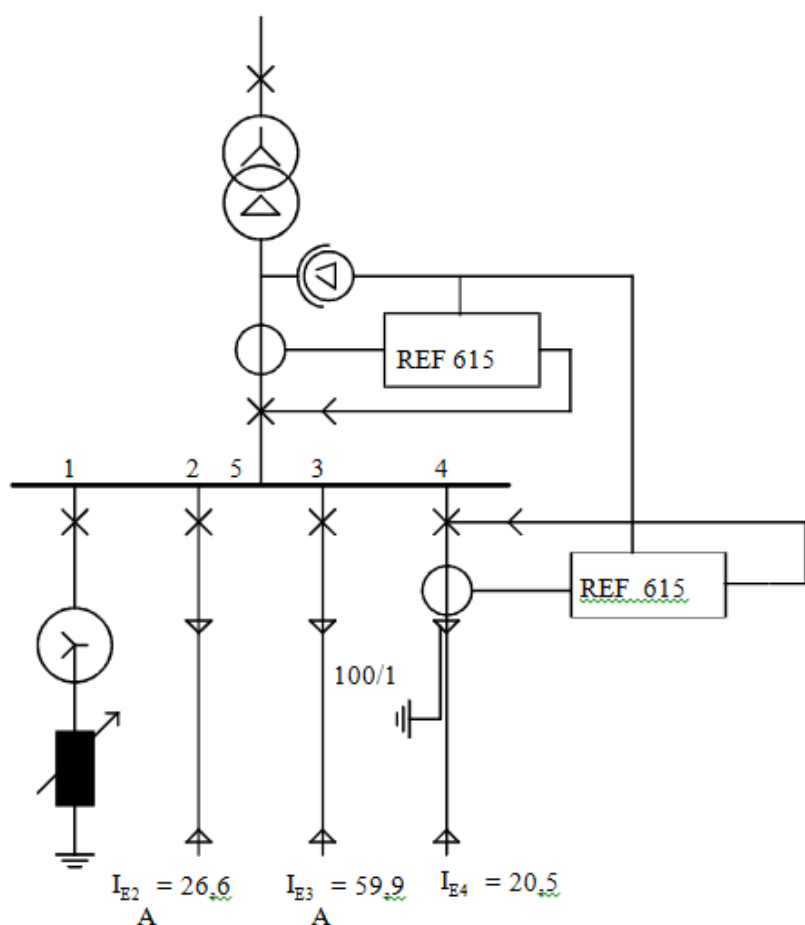
Maasta erotetussa verkossa ja kompensoidussa verkossa taustaverkossa ilmaantuvassa viassa releen laskema admittanssi on sama, jos sähköverkot ovat identtisiä, maadoitustapoja lukuun ottamatta. Suojatulla johtolähdöllä ilmaantuvan maasulkuvian admittanssin mittauksessa sen sijaan on suuri ero näillä maadoitustavoilla. Maasta erotetussa verkossa admittanssi koostuu lähes täysin imaginäärikomponentista, kun taas kompensoidussa sähköverkossa admittanssi koostuu suuresta resistiivisestä komponentista ja imaginäärikomponentin suuruus riippuu kuristi-

men kompensointiasteesta. Aiemmin esitetyn kompensoidun sähköverkon suojausten toimintakarakteristiikan (Go, Bo) asetellut pätevät myös maasta erotettuun sähköverkkoon, koska suojatulla johtolähdöllä tapahtuvan vian myötä admittanssin arvo liikkuu releen toiminta-alueelle maadoitustavasta riippumatta. /4/

Merkittävin ero maasta erotetun verkon ja kompensoidun verkon välillä on nollajännitteen käyttäytyminen terveen tilan aikana sekä vian aikainen vikavirta. Nollajännite voi vaihdella terveessä tilassa kompensoidussa verkossa merkittävästi enemmän kuin maasta erotetussa verkossa, jossa nollajännite on erittäin pieni. ”Voltage start value” tulee valita maasta erotetun verkon nollajännitteen mukaan, koska muuten maasta erotetussa verkossa ei saavuteta riittävää herkkyyttä releen toiminnalle. Tästä syystä laajakulma-asetellut toimivat parhaiten silloin, kun sähköverkossa on riittävän tiheään vaihepositioiden vaihtelua, jotta sähköverkon ollessa kompensoituna, terveen tilan aikana nollajännite olisi mahdollisimman pieni. Nollajännitteen ollessa liian suuri terveen tilan aikana kompensoidussa sähköverkossa, kuvasta 16 nähdään kuinka maasta erotettuun verkkoon vaihdettaessa ei saavuteta kovin herkkää maasulkusuojausta.

5 LABORATORIOKOKKEET

Laboratoriokokeissa tavoitteena oli päästä sellaisiin suojausfunktion asetteluarvoihin, jossa asetellut toimisivat sekä maasta erotetussa sähköverkossa että kompensoidussa sähköverkossa. Lisäksi tavoitteena oli saavuttaa mahdollisimman hyvä herkkyys suojausfunktion toiminnalle, jotta rele laukaisisi suuremmillakin vikavastuksen arvoilla.



Kuva 18. 20kV:n sähkönjakeluverkkomalli.

Laboratoriossa oli käytössä kuvan 18 mukainen 20kV:n sähkönjakeluverkkomalli, jossa kokeet ja mittaukset suoritettiin. Suojareleenä käytettiin ABB REF615-relettä. Mallissa pystyttiin luomaan maasulkuvikoja eri paikkoihin ja näin ollen tarkastelemaan releen suojausfunktion toimintaa vikatilanteissa. Vikavastuksen valintaa varten oli mallissa valintakytkin, jolla pystyttiin valitsemaan vikavastuksen suuruus. Valintakytkimessä oli arvot 0Ω , 500Ω , 1000Ω ja 3200Ω . Suurempiin

vikavastuksen arvoihin päästiin ulkoisilla säädettävillä vastuksilla, joilla saavutettiin jopa $15\text{k}\Omega$:n vikavastuksen suuruus. Kompensointikuristimena oli käytössä Trenchin valmistama itsestään virittäytyvä kuristin.

Kokeita suoritettiin maasta erotetussa sähköverkossa ja kompensoidussa sähköverkossa. Maadoitustavasta riippumatta kokeet ja mittaukset suoritettiin täydellä sähköverkolla maasulkuvian ollessa sekä releen etupuolella että taustaverkossa. Mittauksia tehtiin myös tilanteissa, joissa suurimman maasulkuvirran aiheuttava johtolähtö oli kytketty pois mallista. Tällöin otettiin mittaukset myös maasulkuvian ollessa sekä releen etupuolella että taustaverkossa. Mittaukset otettiin ylös releen omista mittauksien taltioinneista.

5.1 EFPADM (Admittanssipohjainen maasulkusuojaus)

Tavoitteena kokeille oli määrittää laajakulma-asettelut, joilla saavutetaan mahdollisimman hyvä herkkyys verkon maadoitustavasta riippumatta. Releelle aseteltiin EFPADM-suojausfunktiole seuraavan taulukon 3 mukaiset asetteluarvot. Asettelut eroavat taulukon 2 pelkän kompensoidun verkon asetteluille ”*voltage start value*”-arvossa. Jotta saavutettaisiin haluttu herkkyys myös silloin, kun maadoitustapa muuttuu kompensoidusta maasta erotettuun, tuli ”*voltage start value*”-asettelu pienentää arvoon $0,03 \times U_N$. Taulukossa 3 on esitettyinä mittauksissa käytetyt releen laajakulma-asettelut.

Taulukko 3. Laajakulma-asettelut releelle.

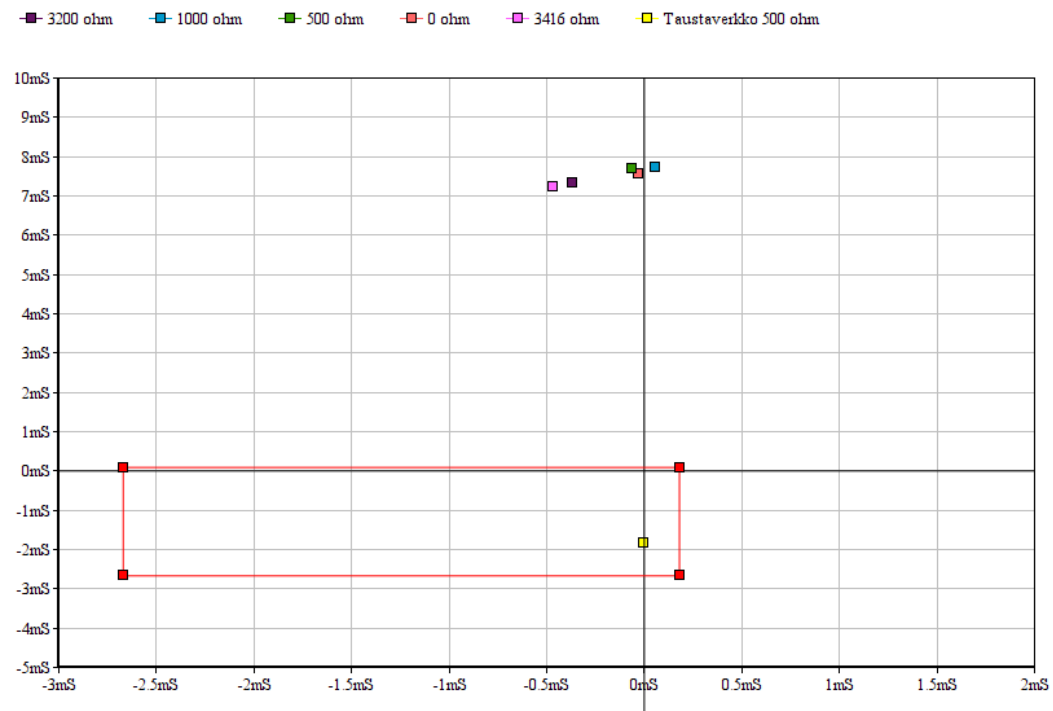
| | |
|---------------------|--------------------------|
| Voltage start value | $0,03 \times U_N$ |
| Operation mode | Go, Bo (Non-directional) |
| Conductance forward | 0,18 mS |
| Conductance reverse | -2,67 mS |
| Susceptance forward | 0,09 mS |

| | |
|---------------------|----------|
| Susceptance reverse | -2,67 mS |
| Operate delay time | 60 ms |

5.2 Maasta erotettu sähköverkko

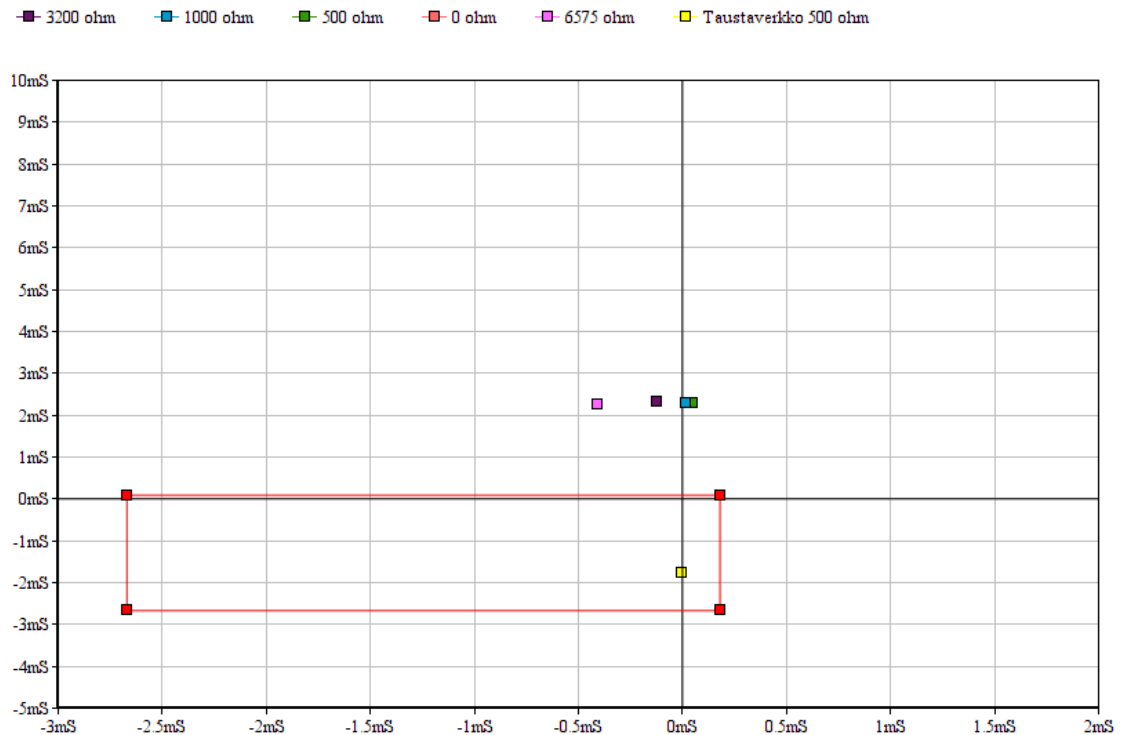
Jakeluverkkomallissa rele suojasi johtolähtöä 4. Kokeet suoritettiin maasta erotetussa sähköverkossa eri vikavastuksien arvoilla. Mittaukset otettiin täydestä verkosta sekä verkosta, jossa suurimman maasulkuvirran tuottama johtolähtö oli kytketty pois verkosta. Jakeluverkkomallin johtolähdöistä suurimman maasulkuvirran tuotti johtolähtö 3. Releen suojaamalle johtolähdölle 4 tehtiin maasulkuvika vikavastuksien arvoilla 0Ω , 500Ω , 1000Ω , 3200Ω sekä etsittiin vikavastuksen suurin arvo, jolla rele laukaisi. Releen taustaverkkoon tehdystä maasulkuviasta mitattiin vain yksi arvo vikavastuksen ollessa 500Ω . Mittaukset otettiin sähköverkon tilanteesta, jossa kaikki johtolähdöt oli kytkettynä verkkoon ja tilanteesta, jossa johtolähtö 3 oli kytkettynä pois verkosta. Mittauksista otettiin ylös nollavirran ja -jännitteen arvot sekä näiden välinen kulma, joista saadaan laskettua admittanssin arvo ja selvitettyä miten admittanssi asettuu xy-koordinaatistossa.

Kuvasta 19 nähdään ensimmäisen kokeen mittaustulokset, jotka on otettu maasta erotetussa kaikki johtolähdöt kytkettynä sähköverkkoon. Kuvassa näkyvä punainen nelikulmio on releen asetteluiden mukainen alue, jonka ulkopuolella on releen toiminta-alue. Kuvasta nähdään kuinka maasta erotetussa verkossa releellä suojatulle johtolähdölle tapahtuneissa maasulkuvioissa admittanssi koostuu lähes täysin positiivisesta imaginääriosasta. ”Voltage start value”-asetteluarvo 0,03 mahdollisti releen toiminnan herkkyyden maasta erotetussa sähköverkossa 3416Ω :n vikavastukseen asti. Kuvasta 19 nähdään myös kuinka taustaverkossa tapahtuneessa maasulkuviassa admittanssin arvo asettuu punaisen nelikulmion sisäpuolelle, jonka takia rele ei reagoinut siihen ja toimi näin ollen oletetun mukaisesti.



Kuva 19. Admittanssien arvot maasta erotetussa sähköverkossa, jossa kaikki johtolähdöt on kytkettyä verkkoon. /Liite 1/

Kuvasta 20 nähdään eri tilanteiden maasulkuvikojen admittanssien arvot maasta erotetussa sähköverkossa, kun suurimman maasulkuvirran tuottama johtolähtö eli johtolähtö 3 oli kytkettyä pois verkosta. Kuvasta huomataan miten johtolähdön 3 poissaolo on vaikuttanut admittanssin arvoihin ja erityisesti susceptanssin arvot ovat pienemmät. Sähköverkon rakenteen muuttuminen ei vaikuttanut releen toimintaan maasulkuvioissa vikavastuksen arvoon 3200Ω :n asti. Rele toimi kuitenkin herkemmin kuin täydellä verkolla, sillä rele laukaisi jopa 6575Ω :n vikavastukseen asti. Taustaverkkoon tehdyn maasulkuvian aikana admittanssi pysyi raja-alueen sisällä, jolloin rele ei laukaissut ja toimi oletetusti.



Kuva 20. Admittanssien sijoittuminen eri vikatilanteissa maasta erotetussa verkossa, kun johtolähtö 3 on kytkettynä irti verkosta. /Liite 1/

5.2.1 Kompensoitu sähköverkko

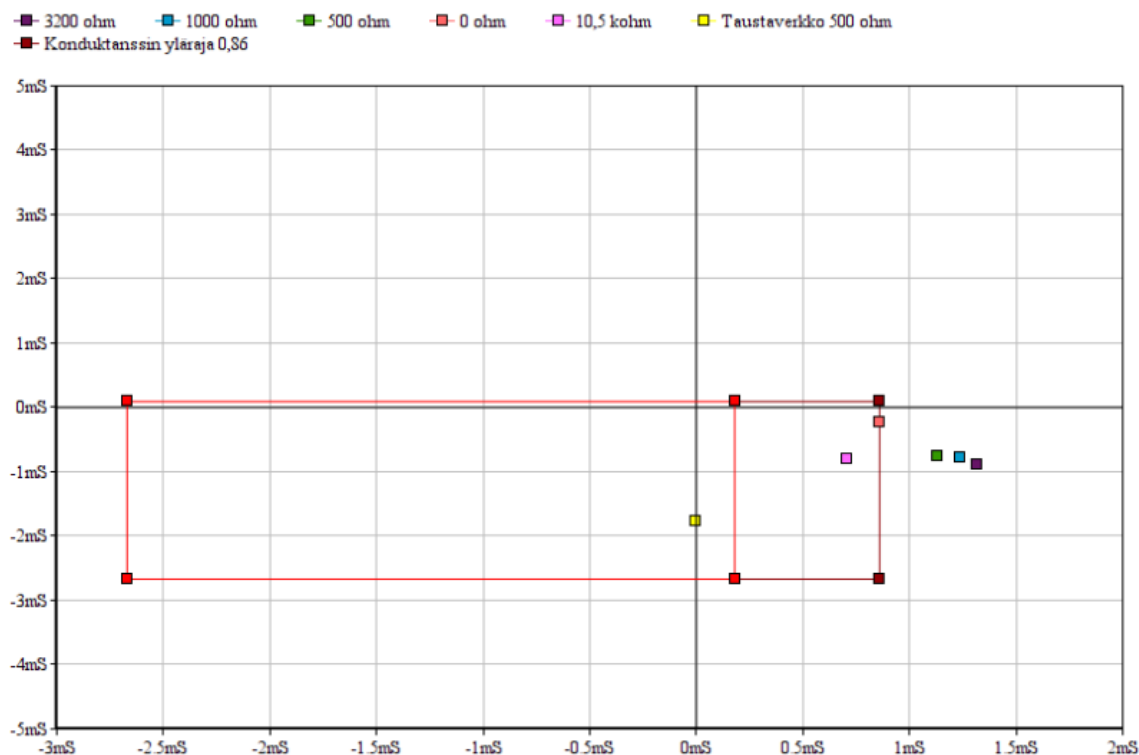
Kompensoidun sähköverkon kokeita varten kompensointikuristimenä käytettiin Trenchin valmistamaa kuristinta. Kyseinen kompensointikuristin viritti itsensä verkon rakenteen mukaan. Kompensointikuristin tuotti itsessään täydessä verkossa 7,9 A:n pätövirran. 7,9 A pätövirtaa vastaava konduktanssin arvo on:

$$\frac{7,9A}{20kV/\sqrt{3}} = 0,68 \text{ mS} \quad (24)$$

Ensimmäisenä ajatuksena oli kompensoida kuristimen tuottaman pätövirran konduktanssi, jolloin ”conductance forward”-asettelua muutettiin lisäämällä kuristimen aiheuttama konduktanssi alkuperäiseen asetteluarvoon. Tällöin ”conductance forward”-asetteluksi tuli $0,18 \text{ mS} + 0,68 \text{ mS} = 0,86 \text{ mS}$. Ensimmäiset mittaukset kompensoidulla sähköverkolla tehtiin ”conductance forward”-asetteluarvolla 0,86 mS, mutta mittauksien edetessä vaiheeseen, jossa johtolähtö 3 oli kytkettynä pois verkosta, todettiin, ettei kyseinen asetteluarvo toimitakaan. Johtolähdön 3 ollessa pois kytkettynä verkosta, kompensointikuristin tuotti vain 2,5 A pätövirtaa. Näin

ollen kompensoitava kuristimen aiheuttama konduktanssi on paljon pienempi kuin täydellä verkolla, jolloin ”conductance forward”-asetteluarvoa tulisi jälleen muuttaa. Tavoitteena oli määrittää asetteluarvot, joita ei tarvitse muuttaa, joten conductance forwardin asetteluarvoksi päätettiin laittaa alkuperäinen 0,18 mS. ”Conductance forward”-asetteluarvo ei vaikuta releen toimintaan maasta erotetussa verkossa.

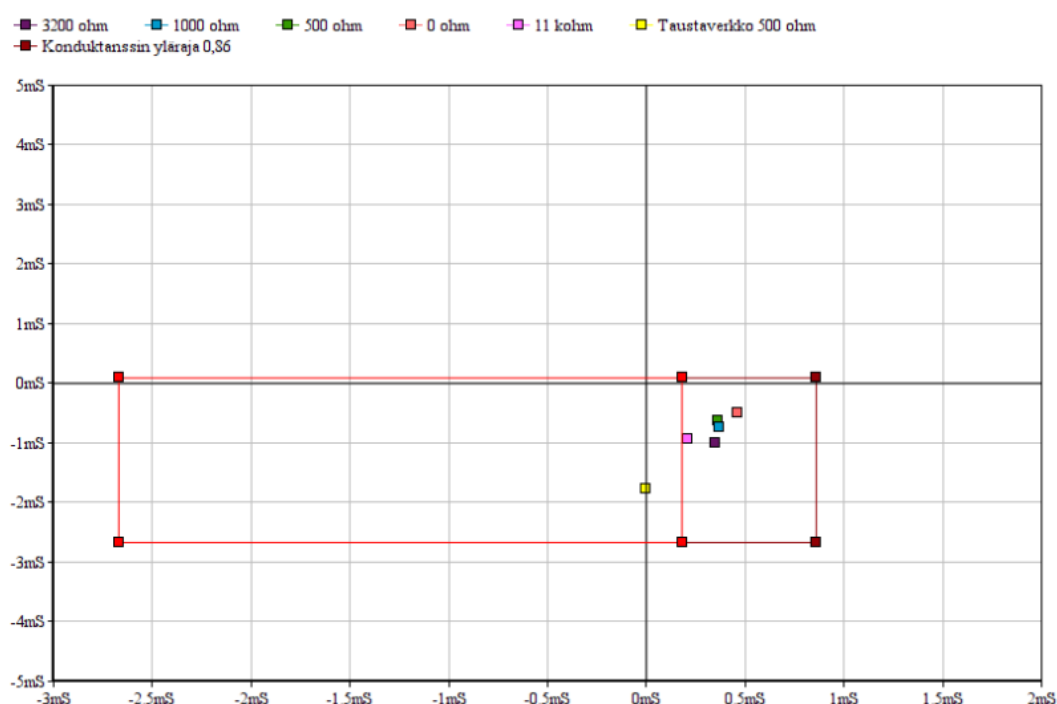
Kompensoidulla sähköverkolla tehtiin samat kokeet kuin maasta erotetulla verkolla ja lopulta myös samoilla asetteluarvoilla. Kuvien 22 ja 23 mittaukset on otettu conductance forwardin arvolla 0,18 mS, mutta kuviin on havainnollistettu releen toiminta myös conductance forwardin arvolla 0,86.



Kuva 21. Admittanssien sijoittuminen eri vikatilanteissa kompensoidussa sähköverkossa, jossa kaikki johtolähdöt on kytkettynä verkkoon. /Liite 1/

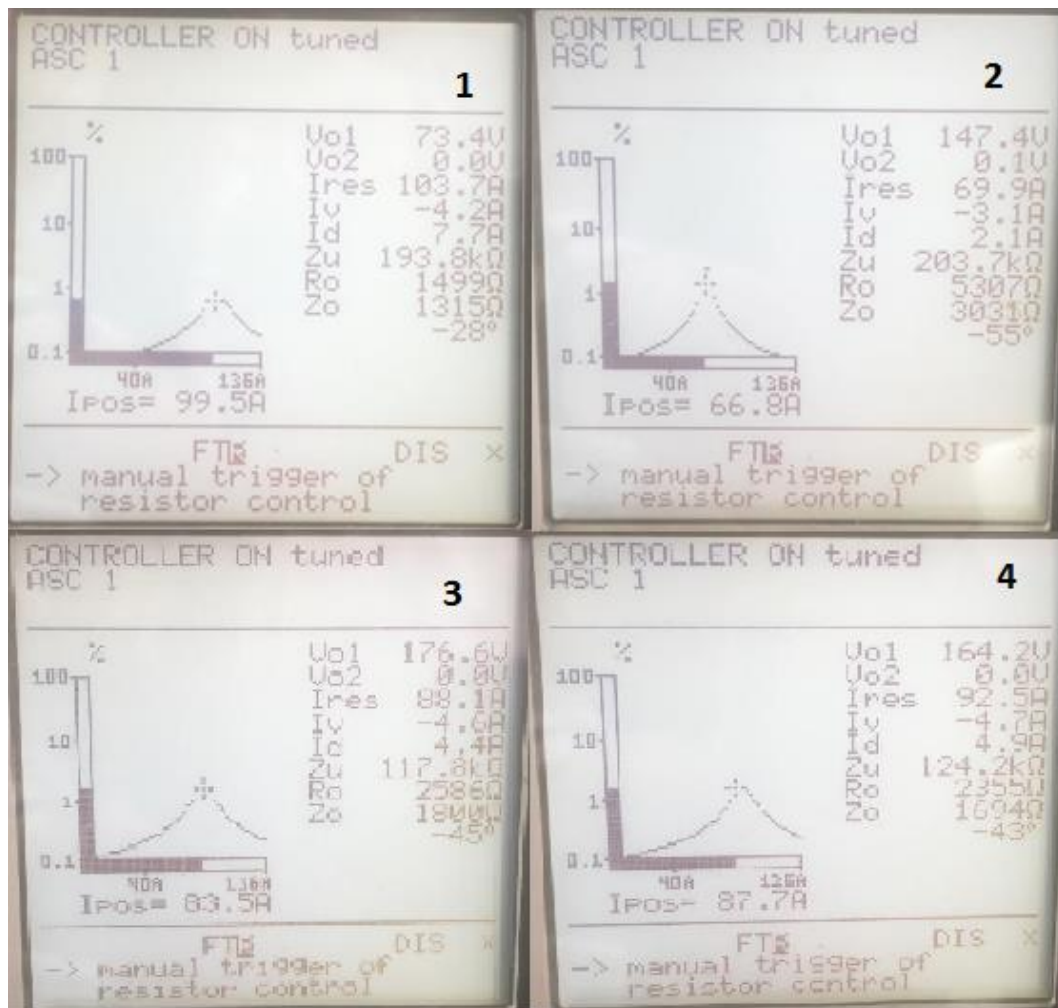
Kuvassa 21 nähdään admittanssien sijoittuminen eri vikatilanteissa, kun kaikki johtolähdöt on kytkettynä sähköverkkoon. Kuvasta huomataan kuinka kompensoidussa sähköverkossa admittanssien arvot koostuvat enimmäkseen konduktanssista. Kaikkien johtolähtöjen ollessa kytkettynä verkkoon saavutettiin releen toi-

minnan rajaksi 10,5 k Ω :n vikavastus. Kuristimen rinnalle kokeiltiin kytkeä 10A:n lisävastus, jolla oli tarkoituksena parantaa herkkyyttä, mutta se ei vaikuttanut mitenkään releen toimintaan, koska nollajännite ei ylittänyt ”voltage start value”-asetteluarvoa. Kuvasta 21 nähdään, jos konduktanssin ylärajana olisi ollut 0,86 mS, ei releellä olisi saavutettu 10,5 k Ω :n herkkyyttä, koska kyseisen vikavastuksen aiheuttaman admittanssin arvo ei olisi ylittänyt konduktanssin ylärajaa. Taustaverkkoon tehdyssä maasulkuviassa admittanssin arvo pysyi raja-alueen sisäpuolella, eikä rele näin ollen laukaissut.



Kuva 22. Admittanssien sijoittuminen eri vikatilanteissa, kun johtolähtö 3 on kytkettynä pois sähköverkosta. /Liite 1/

Kuvasta 22 nähdään hyvin johtolähdön 3 poissaolon vaikutukset kompensoidussa sähköverkossa. Vikatilanteiden aiheuttamat admittanssien arvot ovat pienempiä kuin täydellä verkolla. Kuvasta nähdään kuinka konduktanssin ylärajan asettelu- arvolla 0,86 mS, ei rele olisi laukaissut ollenkaan, koska admittanssit eivät olisi poistuneet raja-alueelta. Releen herkkyydessä ei ollut suuria muutoksia johtolähdön 3 oltuna pois kytkettynä. Releellä saavutettiin 11 k Ω :n herkkyyys, kun johtolähtö 3 oli poiskytkettynä. Taustaverkkoon tehdyssä maasulkuviassa ei rele laukaissut, koska admittanssin arvo pysyi määritetyn raja-alueen sisällä.



Kuva 23. Trench kompensointikuristimen HMI-kuvat verkon eri kytkentätilanteissa. **1.** Kaikki johtolähdöt kytketty. **2.** Johtolähtö 3 pois kytkettynä. **3.** Johtolähtö 2 pois kytkettynä. **4.** Releellä suojattu johtolähtö 4 pois kytkettynä.

Kuvasta 23 nähdään kompensointikuristimen säätäjän virittäytymiset verkon eri kytkentätilanteissa. Kuvasta huomataan kuinka verkon kokonaisvaimennus I_d , joka tuottaa saman kokoisen pätkökomponentin, muuttuu verkon rakenteen muuttuessa. Tästä syystä konduktanssin ylärajan asettelua ei voida perustella verkon luonnollisten häviöiden mukaan, koska se ei ole vakio.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn tavoitteena oli luoda ohjeistus asetteluiden laskentaan admittanssipohjaisessa maasulkusuojausfunktiossa eli EFPADM-funktiossa. Työssä tutkittiin EFPADM-funktion toimintaa 20kV:n jakeluverkossa sekä maasta erotetulla maadoitustavalla että kompensoidun verkon maadoitustavalla. Tarkoituksena oli määrittää asetteluarvot, jotka toimisivat molempien maadoitustapojen mukaisissa sähköverkoissa ilman asetteluiden muutoksia myös tilanteissa, joissa jakeluverkon rakenne on muuttunut mahdollisen johtolähdön poiskytkemisen myötä.

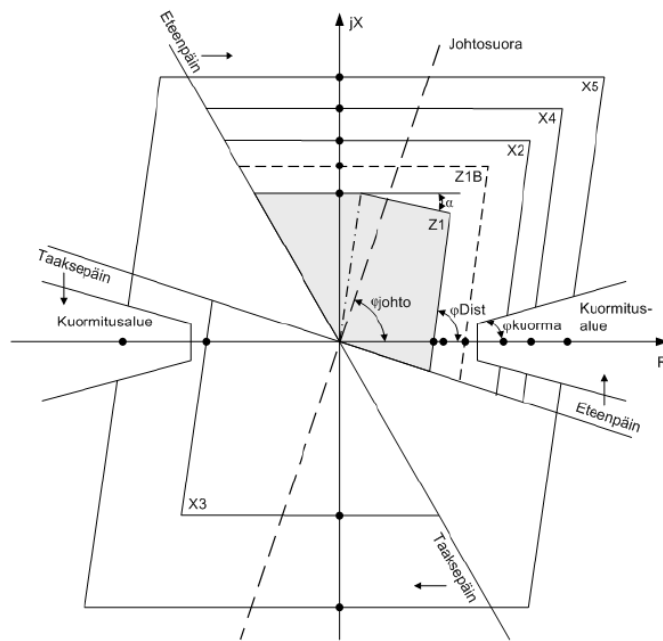
Laboratoriokokeissa tutkittiin EFPADM-funktion toimintaa maasulkuvian aikana 20kV:n jakeluverkkomallilla lasketuilla asetteluarvoilla. Laboratoriossa saavutettiin hyviä tuloksia pienten asettelumuutoksien jälkeen. Suojaus saatiin toimimaan maasta erotetussa verkossa 3416 Ω :n herkkyydellä ja samoilla asetteluarvoilla kompensoidussa sähköverkossa 10,5 k Ω :n herkkyydellä. Releen toiminnan herkkyyteen vaikuttivat asetteluarvoista eniten asetellut ”*voltage start value*” ja ”*conductance forward*”.

Voltage start valuen pieni asetusarvo 0,03 xUn mahdollisti toiminnan suuren herkkyyden sähköverkon ollessa kompensoituna, mutta mikäli jakeluverkossa esiintyisi terveessä tilassa paljon nollajännitettä, ei suojausfunktiossa voitaisi käyttää näin pientä voltage start valuen arvoa. Mikäli ”voltage start value” olisi suurempi, ei saavutettaisi riittävää herkkyyttä maasta erotetussa verkossa, joten laajakulmaisen toiminnan tekee mahdolliseksi pieni ”voltage start value”.

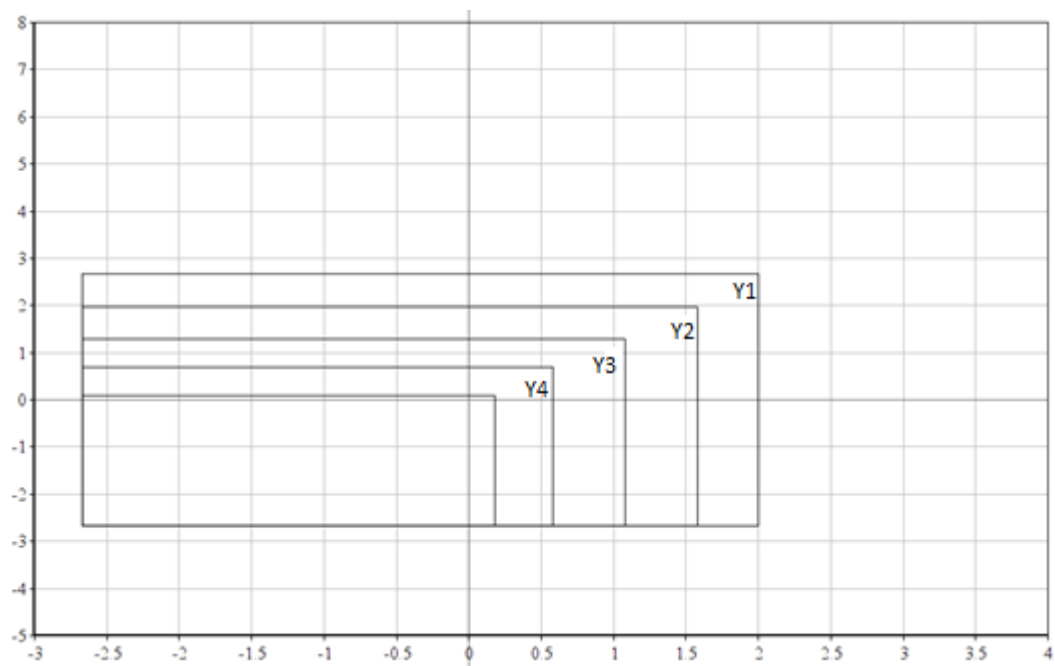
”Conductance forward”-asetteluarvo eli konduktanssin yläraja vaikuttaa releen toimintaan vain sähköverkon ollessa kompensoitu, koska maasta erotetussa verkossa maasulkuvian aikana admittanssi koostuu lähes täysin susceptanssista. Konduktanssin ylärajan arvo laskettiin oletetun kompensointikuristimen rinnalle kytkettävän vastuksen suuruudesta arvoksi 0,18 mS. Rinnakkaisvastusta ei otettu käyttöön, koska kompensointikuristin tuotti itsessään jo lähes yhtä suuren virran pätökomponentin kuin minkä rinnakkaisvastus olisi tuottanut. Kompensointikuristimen tuottaman virran pätökomponentin suuruus vaihteli, kun jakeluverkon rakennetta muutettiin, joten konduktanssin ylärajan asetusarvoa ei kompensoitu ku-

ristimen tuottaman pätökomponentin mukaan. Alun perin oletetun rinnakkaisvas-
tuksen mukaan lasketun konduktanssin ylärajan arvolla saavutettiin hyviä tulok-
sia, joten se jätettiin sellaiseksi.

Laboratoriokokeiden aikana heräsi kysymyksiä funktion toimintaan liittyen. En-
simmäisenä kysymyksenä kannattaisiko EFPADM-funktioon asettaa useampi ai-
kaporras tai toimintavyöhyke. Useampi toimintavyöhyke voisi mahdollistaa selek-
tiivisemmän toiminnan releelle. Toimintavyöhykkeet voitaisiin mahdollisesti räät-
älöidä erikseen maasta erotetulle verkolle ja kompensoidulle verkolle yhden ns.
hybridiasettelujen sijaan. Aikaporrastusta voitaisiin käyttää samaan tapaan kuin
impedanssiin perustuvassa distanssisuojauksessa, ja näin saada selektiivisyyttä
paremmaksi. Distanssisuojauksessa releen aikaporrastus toimii siten, että rele lau-
kaisee sitä nopeammin mitä pienempi impedanssinen vika. Admittanssipohjaises-
sa maasulkusuojauksessa tämä tapahtuisi päinvastaisesti, eli mitä suurempi admit-
tanssi sitä nopeammin rele laukaisisi. Kuvassa 24 on näytetty impedanssiin perus-
tuvan distanssisuojauksen toimintakaracteristiikka ja sen toimintavyöhykkeet.
Vyöhykkeet on aikaporrastettu siten, että mitä lähempänä impedanssi on origoa,
sitä nopeammin rele laukaisee. Kuvassa 25 on ajateltu miltä admittanssipohjaises-
sa maasulkusuojauksessa aikaporrastetut toimintavyöhykkeet voisivat näyttää.
Vyöhykkeet toimisivat siten, että mitä kauempana admittanssin arvo on origosta,
sitä nopeammin rele laukaisisi.



Kuva 24. Distanssisuojauksen toimintavyöhykkeet. /2/



Kuva 25. Admittanssipohjaiseen maasulkusuojaukseen pohditut toimintavyöhykkeet.

Toinen pohdintaa aiheuttava kysymys oli Trench:n kompensointikuristimen itsessään tuottama virran pätökomponentti ja sen kompensoinnin tarpeellisuus. Alun perin tarkoituksena oli kytkeä maasulkuvian aikana kuristimen rinnalle vastus,

joka aiheuttaisi admittanssin suuren pätökomponentin ja täten myös releen laukaisun. Nyt kompensointikuristin tuotti jo ilman rinnakkaisvastusta suuren pätökomponentin ja näin ollen rele laukaisi vikatilanteessa. Tässä kohtaa mietittiin jos konduktanssin ylärajaa nostamalla kompensoitaisiin asetteluissa kuristimen tuottama pätökomponentti, jotta rele ei reagoisi siihen ja kytkemällä kuristimen rinnakkaisvastus vasta laukaisisi releen. Kuristimen tuottama virran pätökomponentti kuitenkin muuttui verkon rakenteen muuttuessa, joten kiinteää asetusarvoa konduktanssin ylärajalle ei voitu määrittää kuristimen pätökomponentin ”nollaamiseksi”. Releen toiminnalle saavutettiin kuitenkin hyviä tuloksia ilman rinnakkaisvastusta, kun konduktanssi otettiin kompensointikuristimesta, joten rinnakkaisvastus todettiin tarpeettomaksi ja näin myös asetteluihin ei tehty muutoksia kuristimen aiheuttaman konduktanssin takia.

Tässä työssä käsitelty EFPADM-funktio ei ole ainoa admittanssiin pohjautuva maasulkusuojausfunktio. REF 615-releellä on myös toteutettavissa uudempi monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojausfunktio MFADPSDE. Tämän työn jatkoksi olisi hyvä tehdä oma konfigurointiohjeistus myös MFADPSDE-funktiolle.

EFPADM-funktiolle olisi myös hyvä kehittää releen käyttöliittymään visuaalisesti esitetty admittanssin sijoittuminen admittanssitason reaali-imaginääri koordinaatistoon. Tällä hetkellä admittanssin arvon saa releeltä vain kompleksilukuna. Tämä ominaisuus voisi helpottaa informaation välittymistä releen käyttäjälle tai koestajalle.

LÄHTEET

/1/ Koski, J. 2016. Sähköverkot. Vaasa. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opetusmateriaali.

/2/ Mäkinen, O. 2016. Relesuojaus. Vaasa. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opetusmateriaali.

/3/ SFS 6001. Suurjännitesähköasennukset. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2015. 156 s.

/4/ ABB REF615 technical manual 2016.

/5/ Wahlroos, A & Altonen, J. 2011. *Compensated networks and admittance based earth-fault protection*. ABB Oy Distribution Automation.

LIITE 1: MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Taulukko 1. EFPADM-funktion asettelut kokeissa.

| | |
|---------------------|--------------------------|
| Voltage start value | 0,03 xUn |
| Operation mode | Go, Bo (Non-directional) |
| Conductance forward | 0,18 mS |
| Conductance reverse | -2,67 mS |
| Susceptance forward | 0,09 mS |
| Susceptance reverse | -2,67 mS |

Taulukko 2. Mittaustulokset maasulkutilanteissa maasta erotetussa verkossa, kun kaikki lähdöt on kytkettynä.

| Maasta erotettu verkko: täysverkko | | | Toiminta |
|------------------------------------|--------------------|-----------|----------|
| 3200 ohm | | | |
| Io | 0,027 xIn 92,91deg | | |
| Uo | 0,032 xUn | | |
| Yo | -0,37+7,33j | mS | kyllä |
| | | | |
| 1000 ohm | | | |
| Io | 0,087 xIn 89,55deg | | |
| Uo | 0,098 xUn | | |

| | | | |
|---|--------------------|-----------|-------|
| Yo | 0,06+7,72j | mS | kyllä |
| | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 0,168 xIn 90,44deg | | |
| Uo | 0,190 xUn | | |
| Yo | -0,06+7,69j | mS | kyllä |
| | | | |
| 0 ohm | | | |
| Io | 0,831 xIn 90,22deg | | |
| Uo | 0,955 xUn | | |
| Yo | -0,03+7,57j | mS | kyllä |
| | | | |
| rajapiste | 3416,75 | oh m | |
| Io | 0,025 xIn 93,74deg | | |
| Uo | 0,030 xUn | | |
| Yo | -0,47+7,23j | mS | kyllä |
| Maasta erotettu verkko: taustaverkko | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 4,8A -90deg | | |
| Uo | 2,633 kV | | |
| Yo | -1,82j | mS | ei |

Taulukko 3. Mittaustulokset maasulkutilanteissa maasta erotetussa verkossa, kun johtolähtö 3 on pois kytkettynä.

| Maasta erotettu verkko: JL3 irti | | | Toiminta |
|----------------------------------|---------------------|-----------|--------------|
| 3200 ohm | | | |
| Io | 0,019 xIn 92,91deg | | |
| Uo | 0,071 xUn | | |
| Yo | -0,12+2,32j | mS | kyllä |
| | | | |
| 1000 ohm | | | |
| Io | 0,059 xIn 89,55deg | | |
| Uo | 0,223 xUn | | |
| Yo | 0,02+2,3j | mS | kyllä |
| | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 0,107 xIn 88,66deg | | |
| Uo | 0,404 xUn | | kyllä |
| Yo | 0,05+2,3j | mS | |
| | | | |
| rajapiste | 6575 | ohm | |
| Io | 0,010 xIn 100,22deg | | |

| | | | |
|--|-------------------|----|-------|
| Uo | 0,038 xUn | | |
| Yo | -0,41+2,25j | mS | kyllä |
| Maasta erotettu verkko: taustaverkko JL3 irti | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 9,68 A deg -62,91 | | |
| Uo | 5,49kV deg 27,09 | | |
| Yo | -1,76j | mS | ei |

Taulukko 4. Mittaustulokset maasulkutilanteissa kompensoidussa verkossa, kun kaikki johtolähdöt on kytkettynä.

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------|----|-------|
| Kompensoitu verkko Trench: | | | |
| 3200 ohm | | | |
| Io | 0,029 xIn -34,47deg | | |
| Uo | 0,158 xUn | | |
| Yo | 1,32-0,9j | mS | kyllä |
| | | | |
| 1000 ohm | | | |
| Io | 0,063 xIn -32,44deg | | |
| Uo | 0,372 xUn | | |
| Yo | 1,24-0,79j | mS | kyllä |
| | | | |

| | | | |
|--|---------------------|-----------|-------|
| 500 ohm | | | |
| Io | 0,087 xIn -33,51deg | | |
| Uo | 0,557 xUn | | |
| Yo | 1,13-0,75j | mS | kyllä |
| | | | |
| 0 ohm | | | |
| Io | 0,095 xIn -14,70deg | | |
| Uo | 0,934 xUn | | |
| Yo | 0,86-0,22j | mS | kyllä |
| | | | |
| rajapiste | 10,5kΩ | | |
| Io | 0,009 xIn -48,66deg | | |
| Uo | 0,073 xUn | | |
| Yo | 0,71-0,8j | mS | kyllä |
| Kompensoitu verkko Trench: taustaverkko | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 12,07A deg -43,13 | | |
| Uo | 6,83kV deg 46,87 | | |
| Yo | -1,77j | mS | ei |

Taulukko 5. Mittaustulokset maasulkutilanteissa kompensoidussa verkossa, kun johtolähtö 3 on pois kytkettynä.

| Kompensoitu verkko Trench: JL3 irti | | | |
|--|---------------------|-----------|-------|
| 3200 ohm | | | |
| Io | 0,033 xIn -70,53deg | | |
| Uo | 0,272 xUn | | |
| Yo | 0,35-0,99j | mS | kyllä |
| | | | |
| 1000 ohm | | | |
| Io | 0,053 xIn -63,05deg | | |
| Uo | 0,565 xUn | | |
| Yo | 0,37-0,73j | mS | kyllä |
| | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 0,059 xIn -59,61deg | | |
| Uo | 0,719 xUn | | |
| Yo | 0,36-0,62j | mS | kyllä |
| | | | |
| 0 ohm | | | |

| | | | |
|---|---------------------|-----------|-------|
| Io | 0,073 xIn -46,87deg | | |
| Uo | 0,940 x In | | |
| Yo | 0,46-0,49j | mS | kyllä |
| | | | |
| rajapiste | 11kohm | | |
| Io | 0,013 xIn -77,52deg | | |
| Uo | 0,119 xUn | | |
| Yo | 0,21-0,93j | mS | kyllä |
| Kompensoitu verkko Trench: taustaverkko jl3 irti | | | |
| 500 ohm | | | |
| Io | 16,95A deg -27,29 | | |
| Uo | 9,61kV deg 62,48 | | |
| Yo | 0,007-1,76j | mS | ei |